

Paalujen dynaaminen koekuormitus ja ehjyysmittaus



Paalujen dynaaminen koekuormitus ja ehjyysmittaus

Liikenneviraston ohjeita 31/2016

Kannen kuvat: Teemu Riihimäki

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-663X

ISSN 1798-6648

ISBN 978-952-317-329-3

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puh. 0295 34 3000

Tekniikka ja ympäristö -osasto

Kohdistuvuus
Tien, radan ja vesiväyliin liittyvät
rakenteet

Voimassa
1.1.2017 alkaen

Asiasanat
paalut, kuormitus, laadunvalvonta, geotekniikka, kapasiteetti

Paalujen dynaaminen koekuormitus ja ehjyysmittaus

Liikenneviraston ohjeita 31/2016

Ohjeessa esitetään vaatimukset paalujen dynaaminen koekuormituksen ja ehjyysmittauksen toteuttamiselle, tulosten tulkinnalle ja niiden raportoinnille. Lisäksi ohjeessa selvennetään alan toimijoille iskuaaltomittauksien periaatteita ja tulkintaa. Tilanteita käsitellään iskuaaltoteorian pohjalta ja konkreettisten esimerkkien avulla.

Tässä ohjejulkaisussa esitetään tavanomaisesta poiketen sekä Liikenneviraston ohjeet että niitä täydentävää ja opastavaa tietoa. Ohjeen asemassa olevat sisällön osat on esitetty erillisellä omalla merkinnällä.

Tekninen johtaja

Markku Nummelin

Geoasiantuntija

Panu Tolla

*Tämä ohje hyväksytään sähköisellä allekirjoituksella.
Merkintä sähköisestä allekirjoituksesta on viimeisellä sivulla.*

LISÄTIETOJA
Panu Tolla
Liikennevirasto
puh. 0295 34 3501

Esipuhe

Ohjeen tarkoituksena on sekä ohjeistaa iskuaaltomittausten suunnittelua, suoritusta ja raportointia, että selventää alan toimijoille iskuaaltomittauksien periaatteita ja tulkintaa. Tilanteita käsitellään iskuaaltoteorian pohjalta ja konkreettisten esimerkkien avulla.

Ohjeessa esitetään myös iskuaaltomittaussignaalin mallinnuksen perusteita, tulkintaa ja tulosten hyödyntämistä suunnittelussa.

Lisäksi ohjeessa on käsitelty low strain -menetelmällä suoritettavien ehjyysmittausten periaatteita, soveltuvuutta, suoritusta ja tulosten tulkintaa.

Iskuaaltomittauksesta on CEN:n alaisen eurooppalaisen työryhmän valmisteltavana. Ohjeessa on ennakoiden huomioitu standardin luonnoksessa esitetyt vaatimukset, jotka eivät sinällään ole merkittävästi muuttamassa nykyistä käytäntöä.

Ohjeen on laatinut Liikenneviraston toimeksiannosta Inspecta Oy. Työryhmään kuuluivat Teemu Riihimäki, Teemu Repo ja Jussi Kinnunen Inspecta Oy:stä. Työtä ohjasivat Panu Tolla ja Veli-Matti Uotinen Liikennevirastosta.

Helsingissä joulukuussa 2016

Liikennevirasto
Tekniikka ja ympäristö -osasto

Sisällysluettelo

KÄSITTEET	7
LYHENTEET	8
1 JOHDANTO	9
1.1 Iskuaaltomittaukset ja signaalinmallinnus	9
1.2 Iskuaaltomittauksien tavoitteet	9
1.3 Vaatimukset mittauksen suorittajalle ja laitteistolle.....	10
1.4 Tehtävät	10
2 DYNAAMINEN KOEKUORMITUS	12
2.1 Dynaamisen koekuormituksen periaatteet.....	12
2.1.1 Yksiulotteinen iskuaaltoteoria.....	12
2.1.2 CASE-menetelmä	15
2.2 Koekuormituksen suunnittelu	18
2.2.1 Mitattavien paalujen valinta.....	19
2.2.2 Mittausajankohdan valinta	19
2.2.3 Paalutyypin ja -materiaalien ominaisuudet koekuormituksessa.....	20
2.3 Mittauksen suoritus	21
2.3.1 Lähtötiedot	22
2.3.2 Anturit	22
2.3.3 Koekuormituslyönti	24
2.3.4 Geoteknisen murtokestävyyden arviointi.....	26
2.4 Iskuaaltokuvaajien tulkinta	27
2.4.1 Voima- ja nopeussignaalkuvaaja	27
2.4.2 Ylöspäin ja alaspäin kulkeva voima.....	29
2.4.3 Energia ja siirtymä	29
2.4.4 Paalun kärjen tulkitseminen.....	32
2.4.5 Jousto paalun kärjessä.....	36
2.4.6 Paalun vaipalta tuleva vastus	38
2.4.7 Paalun impedanssin muutokset	39
3 SIGNAALINMALLINNUS	43
3.1 Signaalinmallinnuksen periaatteet.....	43
3.2 Tulosten tulkinta.....	44
3.2.1 Vaimennuskertoimen J_c vaikutus.....	51
3.2.2 Vetopaalut	52
4 TULOSTEN RAPORTOINTI.....	53
4.1 Koekuormitusraportin keskeinen sisältö	53
5 PAALUJEN EHJYYSMITTAUS LOW STRAIN -MENETELMÄLLÄ	56
5.1 Ehjyysmittauksen periaatteet	56
5.2 Soveltuvuus	58
5.3 Suoritus työmaalla	59
5.3.1 Lähtötiedot	59
5.3.2 Valmistelu.....	60
5.3.3 Isku ja mittaus	60
5.4 Tulosten tulkinta.....	61
5.4.1 Nopeusvastekuvaaja.....	61

Paalujen dynaaminen koekuormitus ja ehjyysmittaus

5.4.2	Poikkeavuudet nopeusvastekuvaajassa	64
5.4.3	Signaalin vahvistus ja suodatus	67
5.4.4	Paalujen ehjyysluokat.....	70
5.4.5	Ehjyysmittauksen tarkkuus ja luotettavuus	71
5.5	Ehjyysmittauksien raportointi.....	71
LÄHTEET		73

LIITTEET

Liite 1	Kärki- ja vaippakestävyys yhdistäminen eri iskuista.
Liite 2	Mittausraporteissa käytetyt merkinnät
Liite 3	Signaalinmallinnuksen kulku

Käsitteet

CASE-menetelmä

Yleisin käytettävistä menetelmistä määritettäessä paalun geoteknistä kestävyyttä dynaamisen koekuormituksen perusteella. Kehitetty 1960 -luvulla Yhdysvalloissa Case Institute of Technologyssä.

CASE-vaimennuskerroin

Yksikötön kerroin, jonka avulla CASE-menetelmässä kuvataan paalun dynaamista vastusta. CASE-vaimennuskerroin on riippuvainen maan ja paalun ominaisuuksista.

Dynaaminen vastus

Kuormituksen nopeudesta riippuva vastus. Dynaamisessa kuormituksessa paalulla on sekä dynaamista että staattista vastusta.

Ehjyysmittaus

Mittaus, jossa selvitetään paalun ehjyys. Ehjyysmittaus voidaan suorittaa low strain tai high strain -menetelmän avulla sekä ultraäänimittauksena.

High strain -menetelmä

Iskuaaltomittausmenetelmä, jossa lyöntilaite aikaansaa suuria muodonmuutoksia paalussa. High strain -menetelmästä voidaan käyttää nimityksenä myös dynaaminen koekuormitus tai PDA-mittaus.

Impedanssi

Paalun dynaamista jäykkyyttä kuvaava suure (Z). Lasketaan kaavalla $Z = \frac{EA}{c}$

Iskuaaltomittaus

Menetelmät, jotka perustuvat yksiulotteiseen iskuaaltoteoriaan. Iskuaaltomittaukset voidaan jakaa low strain ja high strain -menetelmiin.

Low strain -menetelmä

Iskuaaltomittausmenetelmä, jossa käsivasaralla aikaansaadaan vain pieniä muodonmuutoksia paalussa. Low strain -menetelmä on yksi ehjyysmittausmenetelmistä.

Paalun geotekninen murtokestävyys

Paalun kuormittaman maan kestävyuden ääriarvo. Geoteknisen murtokestävyuden arviointia on käsitelty kappaleessa 2.3.4.

Paalun vastus

Maasta paalun kärjen tai vaipan välityksellä kohdistuva vastavoima, joka vastustaa paalun painumista sitä kuormitettaessa.

Quake

Arvo, joka kuvaa paalun siirtymää, jonka jälkeen muodonmuutokset muuttuvat elastisista plastisiksi. Käytetään elastoplastisessa maamallissa kuvaamaan siirtymää, jolla paalun geotekninen murtokestävyys on mobilisoitunut kokonaan.

Signaalinmallinnus

Menetelmä, jossa pyritään matemaattisesti mallintamaan dynaamisessa koekuormituksessa rekisteröityä iskuaaltokuvaajaa mallin parametreja varioimalla.

Staattinen vastus

Paalun kyky vastustaa staattista kuormitusta. Dynaamisen koekuormituksen perusteella määritetty staattinen vastus on sama kuin $R_{c,m}$. Dynaamisessa kuormituksessa paalulla on sekä dynaamista että staattista vastusta.

Lyhenteet

CAPWAP

CASE Pile Wave Analysis Program. Signaalinmallinnus ohjelmisto.

fvp

force-velocity proportionality. Kuvataan voiman ja nopeuden yhdenmittaisuutta dynaamisessa koekuormituksessa.

PDA

Pile Driving Analyzer ®. Mittauslaitteisto dynaamisen koekuormituksen suorittamiseen.

PET

Pile Echo Tester. Ehjyysmittauslaitteisto.

PIT

Pile Integrity Tester. Ehjyysmittauslaitteisto.

RMX

Maximum Case Method. CASE-menetelmän mukainen estimaatti paalun geoteknisen kestävyysarviointiin.

RSP

Standard Case Method. CASE-menetelmän mukainen estimaatti paalun geoteknisen kestävyysarviointiin.

RSU

Unloading Method. CASE-menetelmän mukainen estimaatti paalun geoteknisen kestävyysarviointiin.

SIT

Sonic Integrity Testing. Ehjyysmittauslaitteisto.

1 Johdanto

1.1 Iskuaaltomittaukset ja signaalinmallinnus

Iskuaaltomittaukset jaetaan normaalisti high strain ja low strain -menetelmiin. High strain -menetelmällä tarkoitetaan dynaamista koekuormitusta, jossa iskuaalto saadaan aikaan esimerkiksi paalun upotuksessa käytettävällä lyöntilaitteella. Low strain -menetelmä tarkoittaa paalujen ehjyysmittausta, jossa iskuaalto aikaansaadaan kevyellä käsivasaralla.

Signaalinmallinnuksessa luodaan paalu- ja maamalli, joiden avulla esimerkiksi mitatusta nopeudesta mallinnetaan paaluun vaikuttavat voimat. Mallien dynaamiset ja staattiset parametrit haetaan iteroimalla, kunnes mitatun ja mallinnetun iskuaallon kesken saadaan hyvä vastaavuus.

Dynaamisen koekuormituksen suorittamiseen on saatavilla laitteita eri valmistajilta. Yleisin laitteisto on Pile Dynamics, Inc. valmistama PDA (Pile Driving Analyzer®), jota myös tämän ohjeen esimerkeissä on käytetty. Vastaavanlaiset kuvaajat ja mittaussuureet pystytään esittämään myös muiden laitevalmistajien laitteiden tulosteissa. Jotkin suuret ja kuvaajat voivat olla esitettynä eri nimikkeillä ja muotoilu saattaa poiketa toisistaan, mutta mittauksien ja tulosten analysoinnin periaatteet ovat täysin samat. Muita laitevalmistajia on muun muassa Profound ja Testconsult.

Kolme yleisintä low strain -menetelmään pohjautuvaa kaupallista mittauslaitteistoa ovat Pile Integrity Tester (PIT), Pile Echo Tester (PET) ja Sonic Integrity Testing (SIT). Ohjeessa esitetyt nopeusvastekuvaajien esimerkit on mitattu PIT-laitteistolla.

Signaalinmallinnuksessa käytettäviä ohjelmistoja ovat esimerkiksi CAPWAP (Pile Dynamics, Inc.), TNOWAVE (Profound) ja SIMBAT (Testconsult). Tämän ohjeen signaalinmallinnusosiossa on käytetty CAPWAP-ohjelmistoa ja esitelty kyseisellä ohjelmistolla saatuja tulosteita.

Paalujen dynaamisen koekuormituksen suorittamisesta on valmisteilla standardi (prEN-ISO 22477-4). Oppaassa dynaamisen koekuormituksen suoritusta on käsitelty kuitenkin tarkemmin kuin valmisteilla olevassa standardissa. Kaikki vaatimukset ja ohjeistukset ovat kuitenkin standardin mukaisia (prEN-ISO 22477-4).

1.2 Iskuaaltomittauksien tavoitteet

Paalujen dynaamisella koekuormituksella, tai yleisemmin PDA-mittauksella, tarkoitetaan rakennuspaikalla suoritettavia iskuaaltomittauksia, joissa määritetään ensisijaisesti paalun geotekninen kestävyys koekuormitushetkellä. Paalun dynaamisella koekuormituksella saadaan selville myös lyönninaikaiset veto- ja puristusjännitykset paalussa, iskun keskeisyys ja paaluun lyönnistä siirtynyt energia. Mittaustuloksista voidaan lisäksi arvioida paalun ehjyyttä ja lyöntilaitteen tehokkuutta.

Paalun geoteknistä kokonaisvastusta sekä sen jakautumista paalun kärjen ja vaipan kesken voidaan arvioida tarkemmin signaalinmallinnuksen avulla.

Low strain -menetelmällä suoritettavien ehjyysmittausten tavoitteena on havaita mitatuissa paaluissa mahdollisesti esiintyvät vauriot. Low strain -menetelmän etuna verrattuna high strain -menetelmään on, että koekuormituksessa ei tarvita paalutuskonetta. Lisäksi menetellä on mahdollista mitata suuria määriä paaluja lyhyessä ajassa menetelmän suoritusnopeuden ansiosta.

Iskuaaltomittauksista saatavan hyödyn kannalta mittausten suorittajan, pohjarakennesuunnittelijan ja urakoitsijan yhteistyö on tärkeää. Mittausten suorittajalla tulee olla saatavilla geotekniset piirustukset, paalukartat ja paalutuspöytäkirjat, jotta mittausten suorittaminen ja tuloksien tulkinta voidaan tehdä luotettavasti. Vastaavasti pohjarakennesuunnittelijan on saatava selkeä ja kattava raportti mittaauksista ja analyysistä. Mittaustuloksien hyödyntäminen vaatii myös mittausraportin lukijalta iskuaaltomittausten perusteiden ymmärrystä mittaauksista ja mittaustulosteista.

1.3 Vaatimukset mittauksen suorittajalle ja laitteistolle

Ohje

Iskuaaltokuvaajia saa tulkita ainoastaan henkilö, jolla on riittävä kokemus iskuaaltomittauksista.

Mittaaajan ja tuloksien tulkitsijan tulee olla iskuaaltomittauksiin perehtynyt ja kouluttautunut käytettävän laitteen käyttöön laitevalmistajan järjestämissä koulutuksissa.

Laitteiston tulee olla kohteeseen ja käyttötarkoitukseen soveltuva, kunnossa ja kalibroituna valmistajan ilmoittamien ohjeiden mukaisesti.

Dynaamisten koekuormitusten, ehjyysmittausten ja signaalinmallinnuksen suorittajalla tulee olla tarvittava pätevyys suorittaa ja analysoida iskuaaltomittauksia. Pätevyys voidaan osoittaa laitevalmistajan järjestämällä koulutuksilla. Lisäksi mittausten suorittajalla tulee olla riittävä ymmärrys geotekniikasta ja pohjarakenteiden toiminnasta.

1.4 Tehtävät

Ohje

Kuvassa 1 on esitetty tehtävälista pohjarakennesuunnittelijan, urakoitsijan, tilaajan ja mitaajan tehtävistä iskuaaltomittauksia koskien.

<p>Pohjarakennesuunnittelija</p> <ul style="list-style-type: none"> • Määrittää mittaustarpeen ja mittaamenetelmät (yhteistyössä mittaajan kanssa) • Määrittää mitattavien paalujen lukumäärän • Valitsee mitattavat paalut • Esittää paaluille vaaditut $R_{c,m}$-arvot, huomioiden paalujen koekuormituksen aikaiset jännitykset • Määrittää paalujen alustavat tavoitetasot ja riittävän paalupituuden mittauksen suorittamiselle • Yhdessä urakoitsijan ja mittaajan kanssa suunnittelee/määrittää koepaalutuksen läpiviennin • Huomioi paalujen geoteknisen kestävyyskehityksen mittausajankohtaa valittaessa • Määrittää tarvittavan koekuormituskaluston yhdessä mittaajan kanssa • Lukee ja hyväksyy koekuormitusraportin • On yhteydessä mittausten suorittajaan ja tilaajaan, mikäli herää kysymyksiä koekuormitusraportista 	<p>Urakoitsija</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ennen paalujen asennusta yhteydessä mittaajaan/pohjarakennesuunnittelijaan paalujen asennusta koskien • Toimii yhteistyössä mittaajan ja pohjarakennesuunnittelijan kanssa • Täyttää paalutuspöytäkirjat asianmukaisesti ja raportoi poikkeamat • Toimittaa geotekniset piirustukset mittaajalle • Toimittaa paalutuspöytäkirjat mittaajalle ja suunnittelijalle • Toimii paalujen asennuksessa ja koekuormituksessa suunnittelijan ja mittaajan ohjeiden mukaisesti • Mittaa koekuormituksen aikana paalun pysyvän painuman jokaiselle koekuormitusiskulle • Toimii koekuormitusraportin ohjeiden mukaisesti 	<p>Tilaaja</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hyväksyy suunnittelijan ehdotuksen mittauksen tarpeesta ja käytettävistä menetelmistä • Asettaa vaatimukset mittauksien suorittajalle ja suoritukselle • Hyväksyy mittauksen suorittajan ja suoritteen • Lukee ja hyväksyy koekuormitusraportin
<p>Mittaaja</p> <ul style="list-style-type: none"> • Suorittaa koekuormituksen ja raportoi mittaustulokset • Toimittaa mittausraportin urakoitsijalle ja pohjarakennesuunnittelijalle 		

Kuva 1. Tehtävälista pohjarakennesuunnittelijan, urakoitsijan, tilaajan ja mittaajan tehtävistä paalujen koekuormituksen suhteen.

2 Dynaaminen koekuormitus

2.1 Dynaamisen koekuormituksen periaatteet

Ohje

CASE-menetelmää käytettäessä tulee dynaamisen koekuormituksen raporteissa aina ilmoittaa, mitä paalun murtokestävyyden estimaattia on käytetty. Lisäksi mittauksissa käytetty CASE-menetelmän vaimennuskerroin tulee aina esittää raportin tekstissä sekä mittausskuvaajissa.

Suomessa tukipaaluilla käytetään kokemusperäisesti saatua vaimennuskertoimen arvoa $\geq 0,5$ ja kitkapaaluilla $\geq 0,6$ käytettäessä murtokestävyyden RMX-estimaattia (RIL-254 2011). Avoimilla paaluilla suositellaan käytettäväksi vaimennuskertoimen arvona vähintään 0,7.

Tarvittaessa vaimennuskertoimen tarkempi määrittäminen tehdään signaalinmallinnuksen avulla.

Signaalinmallinnus tehdään aina:

- *kitkapaaluille*
- *vetopaaluille*
- *paaluille, joiden poikkileikkaus ei ole vakio (kärkeä ja jatkoksia lukuun ottamatta)*
- *paaluille, joiden koekuormituksessa anturit on kiinnitetty apupaaluun*
- *tilanteissa, joissa CASE-menetelmällä tehtävään tulkintaan sisältyy tavanomaista suurempaa epävarmuutta.*

Dynaamisessa koekuormituksessa mitataan lyöntilaitteen iskusta paaluun aiheutunut iskuaalto paaluun kiinnitetyillä venymä- ja kiihtyvyyssantureilla. Venymäsantureilla mitataan lyöntilaitteen iskusta aiheutunutta muodonmuutosta paalussa. Kiihtyvyyssantureiden avulla mitataan lyöntilaitteen iskun aiheuttamaa paalun partikkelinopeutta paalussa ajan funktiona.

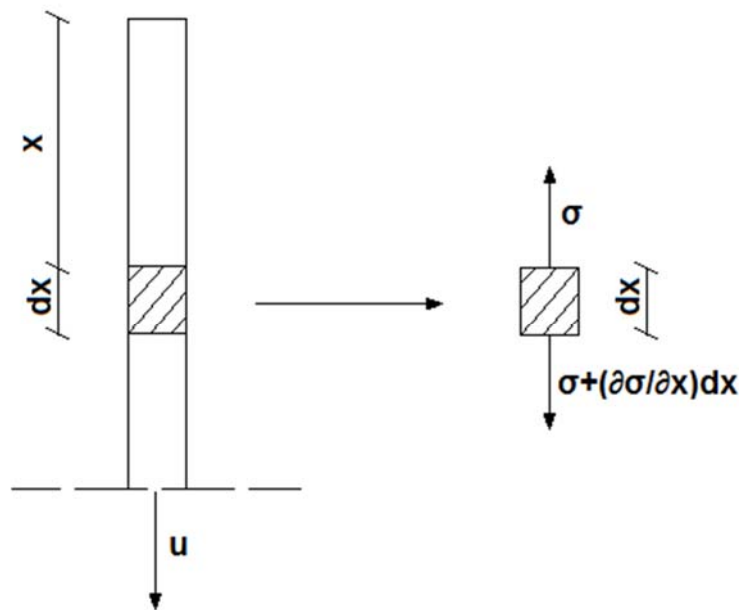
2.1.1 Yksiulotteinen iskuaaltoteoria

Sekä high strain että low strain -menetelmät perustuvat 1-ulotteiseen iskuaalto-teoriaan, jossa tarkastellaan 1-ulotteisia aksiaalisia jännityksiä, muodonmuutoksia ja partikkelinopeuksia.

Paalujen dynaaminen koekuormitus ja ehjyysmittaus

1-ulotteisessa iskuaaltoteoriassa oletetaan, että tarkasteltava paalu on äärettömän pitkä, paalun poikkileikkaus on vakio ja materiaali isotrooppinen. Kuormituksen aikana poikkileikkaustasojen oletetaan säilyvän tasoina ja samansuuntaisina. Aksiaalisten jännityksen oletetaan jakaantuvan tasaisesti koko paalun poikkileikkaukselle. Poikittaissuuntaisia hitausefektejä ei oteta 1-ulotteisessa iskuaaltoteoriassa huomioon.

Paalun yläpäähän syntyy iskusta jännityskenttä $\sigma(x,t)$, joka on esitetty kuvassa 2. Jännityskenttä saa aikaan kuormitetun osan kokoonpuristuman $\varepsilon(x,t)$. Kokoonpuristuma tai venymä saa aikaan jännityskentän siirtymisen eteenpäin, jolloin iskuaalto etenee paalussa puristus- tai vetoaaltona.



Kuva 2. Iskuaallon aiheuttama jännityskenttä paalussa.

Kuvan 2 mukaan dx -pituisen osan liikeyhtälö jännityskentässä on

$$F = \sigma \cdot A = (-\sigma + \sigma + \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx)A = \frac{\partial \sigma}{\partial x} dx A \quad (2.1)$$

A = poikkileikkauksen pinta-ala

σ = aksiaalinen jännitys

x = poikkileikkauksen etäisyys sauvan päästä

Newtonin II:n lain mukaan

$$F = m \cdot a = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \rho A dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.2)$$

m = sauvan massa

a = kiihtyvyys

u = siirtymä

t = aika

ρ = sauvan tiheys

Lineaarisesti kimmoiselle materiaalille on voimassa Hooken laki

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.3)$$

E = sauvan kimmomoduuli

ε = sauvan aksiaalinen venymä

Yhdistämällä yhtälöt 2.1, 2.2 ja 2.3 saadaan

$$E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.4)$$

Iskuaallon nopeus saadaan yhtälöstä

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (2.5)$$

Jonka perusteella yhtälö 2.4 voidaan kirjoittaa muotoon

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2.6)$$

Yhtälön 2.6 ratkaisu on muotoa

$$u(x,t) = f(x+ct) + g(x-ct) \quad (2.7)$$

Funktio $g(x,t)$ edustaa positiiviseen x-akselin suuntaan nopeudella c etenevää aaltoa ja $f(x,t)$ vastakkaiseen suuntaan kulkevaa aaltoa. Aaltoyhtälön lineaarisuuden vuoksi superpositioperiaate on voimassa. Aaltojen summan avulla saadaan selville tietyssä poikkileikkauksessa ja tietyllä ajanhetkenä vaikuttava voima sekä nopeus. Sauvan partikkelinopeus saadaan derivoimalla yhtälö 2.7 ajan suhteen. Venymä saadaan selville derivoimalla sama yhtälö paikan suhteen. Kuvassa 2 on valittu positiiviseksi muodonmuutokseksi puristus.

$$\varepsilon(x,t) = -\frac{\partial u}{\partial x} = -f'(x+ct) - g'(x-ct) \quad (2.8)$$

$$v(x,t) = \frac{\partial u}{\partial t} = c \cdot f'(x+ct) - c \cdot g'(x-ct) \quad (2.9)$$

Edellä todettiin, että aalto $g(x,t)$ etenee positiiviseen x-akselin suuntaan. Tämän perusteella saadaan yhtälöistä 2.8 ja 2.9

$$\varepsilon(x,t) = \frac{1}{c} v(x,t) \quad (2.10)$$

Hooken lain avulla saadaan sauvassa alaspäin kulkevan aallon voimaksi

$$F \downarrow (x,t) = E \cdot A \varepsilon(x,t) = \frac{E \cdot A}{c} v(x,t) = Z \cdot v(x,t) \quad (2.11)$$

$Z = \frac{E \cdot A}{c}$ = sauvan impedanssi

Ylöspäin kulkevan aallon voimaksi saadaan

$$F \uparrow (x,t) = -E \cdot A \varepsilon(x,t) = -\frac{E \cdot A}{c} v(x,t) = -Z \cdot v(x,t) \quad (2.12)$$

Superpositioperiaatteen perusteella kokonaisvoima ja -nopeus sauvassa ovat

$$F = F\downarrow + F\uparrow (= WD + WU) \quad (2.13)$$

$$v = v\downarrow + v\uparrow \quad (2.14)$$

Venymät voidaan muuttaa voimiksi kertomalla yhtälö 2.8 sauvan kimmomoduulilla ja poikkileikkauksen pinta-alalla. Samoin nopeudet voidaan muuttaa voimiksi kertomalla yhtälö 2.9 sauvan impedanssilla, jolloin saadaan yhtälöpari

$$F(x,t) = -E \cdot A \cdot f'(x+ct) - E \cdot A \cdot g'(x-ct) \quad (2.15)$$

$$Zv(x,t) = E \cdot A \cdot f'(x+ct) - E \cdot A \cdot g'(x-ct) \quad (2.16)$$

Yhteenlaskemalla yhtälöparin yhtälöt puolittain saadaan yhtälö 2.17 ja vähentämällä yhtälöparin yhtälöt puolittain saadaan yhtälö 2.18.

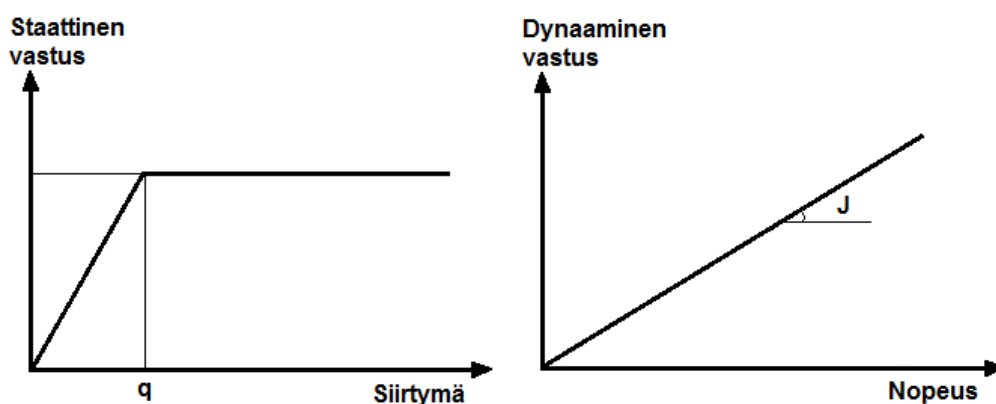
$$F\downarrow = \frac{F(x,t) + Z \cdot v(x,t)}{2} \quad (2.17)$$

$$F\uparrow = \frac{F(x,t) - Z \cdot v(x,t)}{2} \quad (2.18)$$

2.1.2 CASE-menetelmä

Yleisimmin Suomessa käytetään CASE-menetelmää paalun geoteknisen kestävyys arvioinnissa. CASE-menetelmää käytettäessä voidaan geoteknisen kestävyys arvioinnissa käyttää erilaisia estimaatteja. Kolme yleisintä CASE-menetelmän mukaista estimaattia ovat: Standard Case Method (RSP), Maximum Case Method (RMX) ja Unloading Method (RSU).

Maasta paaluun kohdistuva staattinen vastus (=paalun geotekninen kestävyys) laskeaan vähentämällä paalun kokonaisvastuksesta kuormituksen nopeudesta johtuva dynaaminen osuus. Dynaaminen vastus on nopeusriippuvainen kuvan 3 mukaisesti. Staattinen vastus on riippuvainen siirtymästä ja tietyn siirtymän jälkeen staattinen vastus ei enää kasva kuvan 3 tapaan.



Kuva 3. Staattinen ja dynaaminen vastus.

CASE-menetelmässä alaspäin kulkevaan iskuaaltoon ja paalun kärjestä ylöspäin heijastuneeseen aaltoon liittyvä voima ja partikkelinopeus mitataan ajanhetkillä t_1 ja t_2 , jotka ovat ajan $2L/c$:n etäisyydellä toisistaan. Paalun kokonaisvastus (staattinen + dynaaminen) (R_{tot}) lasketaan kaavalla

$$R_{tot} = \frac{F(t_1) + F(t_2)}{2} + \left[\frac{V(t_1) - V(t_2)}{2} \right] \frac{E \cdot A}{c} (= R_{stat} + R_{dyn}) \quad (2.19)$$

R_{tot} = kokonaisvastus

F = voima mittauspisteessä

t_1 = iskun huipun ajankohta

t_2 = paalun kärjestä heijastuneen aallon ajankohta ($t_1 + 2L/c$)

V = partikkelinopeus

c = aallon nopeus paalumateriaalissa

Paalun dynaaminen vastus lasketaan kaavalla

$$R_{dyn} = Z \cdot J_c \cdot V_{base} \quad (2.20)$$

V_{base} = partikkelinopeus paalun kärjessä

CASE-menetelmän yleisimmät estimaatit

RMX-estimaatti (Maximum Case Method) on nykyään yleisin paalun staattisen vastuksen määrittämiseen käytetty menetelmä. RMX-estimaattia käytettäessä haetaan mitatusta voima/nopeus-kuvaajasta aika t_1 , jolla saadaan suurin staattinen vastus. RMX-estimaatti on kehittyneempi versio RSP-estimaatista. RSP-estimaatti antaa luotettavan arvion paalun geoteknisestä vastuksesta vain maltillisilla painuman arvoilla, kun taas RMX-estimaattia voidaan käyttää myös tilanteissa, joissa esiintyy suuria tai pieniä painuman arvoja tai suuria quake-arvoja.

$$RMX = R_{tot} - J_c \left[V(t_1) \frac{E \cdot A}{c} + F(t_1) - R_{tot} \right] \quad (2.21)$$

RMX = staattinen vastus

J_c = CASE-menetelmän vaimennuskerroin

RSU-estimaattia (Unloading Method) käytetään paaluilla, joilla nopeus laskee negatiiviseksi ennen paalun kärkeä. Nopeus voi laskea negatiiviseksi ennen kärkeä, jos paalulla on suuri vaippavastus tai paalu on erityisen pitkä. RSU-estimaatti huomioi myös paalun vaipan yläosan vastuksen, joka jää huomioimatta RMX-estimaattia käytettäessä.

RSP-estimaatti (Standard Case Method) on suurimmaksi osaksi poistunut käytöstä ja korvattu RMX-estimaatilla, kun tietokoneiden laskentateho on kasvanut. Kirjallisuudessa RSP-estimaatti esiintyy kuitenkin vielä usein. RSP-estimaatti on erityisen herkkä vaimennuskertoimen valinnalle silloin, kun paalu painuu paljon. Estimaatti onkin alun perin kehitetty tilanteisiin, joissa paalu painuu koekuormituksessa maltillisesti. RSP-estimaatti ei aina huomioi paalun kärkivastusta täysimääräisesti sellaisissa tilanteissa, joissa esiintyy suuria kärjen quake-arvoja. Tällöin voidaan käyttää aikaviivettä, jolloin RSP-estimaatin laskennassa aikaa t_1 siirretään halutun verran myöhemmäksi, jotta koko kärkivastus tulee huomioiduksi.

CASE-menetelmää käytettäessä tulee dynaamisen koekuormituksen raporteissa aina ilmoittaa, mitä estimaattia on käytetty. Lisäksi mittauksissa käytetty CASE-menetelmän vaimennuskerroin tulee aina esittää raportin tekstissä sekä mittauskuvaajissa.

CASE-vaimennuskerroin, J_c

CASE-vaimennuskerroin on kokemusperäinen, yksikötön vakio. Vaimennuskerroin riippuu sekä maan että paalun dynaamisista ominaisuuksista, mutta dynaamisessa koekuormituksessa vaimennuskerroin, J_c , määritetään paalun kärjen tasolla tai kärkivyöhykkeessä olevan maalajin ja paalun toimintatavan mukaan. Suomessa tukipaaluilla käytetään kokemusperäisesti saatua vaimennuskertoimen arvoa $\geq 0,5$ ja kitkapaaluilla $\geq 0,6$ käytettäessä murtokestävyyyden RMX-estimaattia (RIL-254 2011). Avomilla paaluilla suositellaan käytettäväksi vaimennuskertoimen arvona vähintään 0,7.

Taulukossa 1 on esitetty laitevalmistajan ilmoittamia vaimennuskertoimen ohjearvoja eri maalajeille. Vaimennuskerroin määritetään paalun kärjen tasossa olevan maalajin mukaan. Taulukossa vaimennuskertoimet on ilmoitettu RMX-, RSP- ja RSU-estimaateille. Vaimennuskertoimen ohjearvot ovat kuitenkin vain suuntaa antavia.

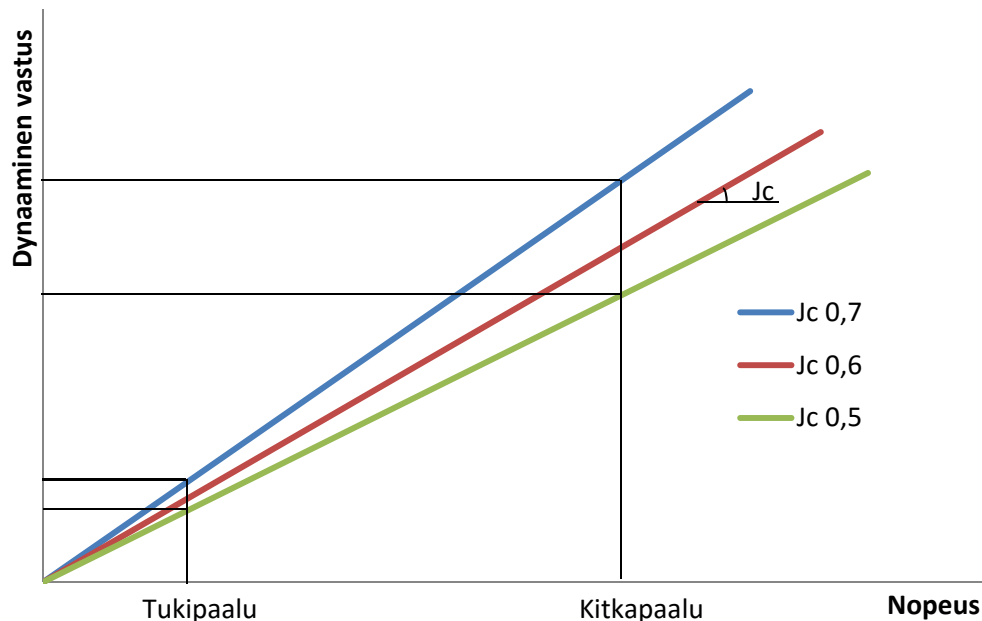
Taulukko 1. Vaimennuskertoimen ohjearvoja eri maaperäolosuhteissa CASE-menetelmän estimaateille (Pile Dynamics, Inc, 2015).

Maalaji	J_c RMX-estimaatti	J_c RSU- ja RSP-
Hiekka (Hk)	0,40–0,50	0,10–0,15
Silttinen hiekka	0,50–0,70	0,15–0,25
Siltti (Si)	0,60–0,80	0,25–0,40
Silttinen savi (siSa)	0,70–0,90	0,40–0,70
Savi (Sa)	$\geq 0,90$	$\geq 0,70$

Vaimennuskerroin voidaan määrittää tarkemmin signaalinmallinnuksen avulla kunkin paalutuskohteen pohjaolosuhteissa ja kussakin koekuormitusvaiheessa (esimerkiksi kitkapaalujen jälkilyönnit). Tällöin on mahdollista käyttää edellä esitetyistä ohje-arvoista poikkeavia vaimennuskertoimen arvoja. Vaimennuskerroin voidaan kalibroida signaalinmallinnuksen lisäksi myös staattisten koekuormitusten avulla. Kalibroitu vaimennuskerrointa voidaan käyttää kohteen muille paaluille, mikäli ne käyttäytyvät asennuksen aikana samalla tavalla ja pohjaolosuhteet eivät merkittävästi muutu. Vaimennuskertoimen vaikutusta mittaustuloksiin on käsitelty kappaleessa 3.2.1.

Vaimennuskertoimen valinnalla voi olla suuri vaikutus paalun staattiseen vastukseen. Vaimennuskerrointa kasvatettaessa dynaamisen vastuksen osuus kasvaa ja staattinen vastus pienenee. Karkearakeisissa maissa dynaamisen vastuksen osuus on usein pienempi kuin hienorakeisissa maissa. Tukipaaluilla paalun kärki on tiiviissä kantavassa kerroksessa, jolloin vaimennuskertoimen valinnalla ei ole suurta merkitystä paalun staattiseen vastukseen, koska partikkelinopeus paalun kärjessä on pieni, eli toisin sanoen dynaaminen vastus on pieni (kuva 3, kaava 2.20). Kitka- ja koheesio-paaluilla paalut ovat taas hienorakeisemmissa maissa, joissa dynaamisen vastuksen osuus on usein suurempi, koska partikkelinopeus paalun kärjessä on suurempi. Kitka-

ja koheesiopaaluilla vaimennuskertoimen valinnalla on siis suurempi merkitys paalun staattiseen vastukseen kuin tukipaaluilla. Tästä johtuen kitkapaaluille tulee aina tehdä signaalinmallinnus vaimennuskertoimen määrittämiseksi, kun taas tukipaalukohteissa tämä ei useinkaan ole tarpeen, koska vaimennuskertoimen merkitys on pieni ja ohjearvot ovat varmalla puolella. Vaimennuskertoimen vaikutusta paalun dynaamiseen vastukseen on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. Vaimennuskertoimen vaikutus paalun dynaamiseen vastukseen.

2.2 Koekuormituksen suunnittelu

Ohje

Pohjarakennesuunnittelija valitsee koekuormitettavat paalut.

Mitattaviksi paaluiksi kohteessa valitaan lähtökohtaisesti aina geoteknisen kestävyyden kannalta epädullisimmat paalut.

Tämän lisäksi dynaamisia koekuormituksia on tehtävä kattavasti koko paalutettavalta alueelta.

Varsinkin pohjasuhteiden vaihdellessa mittauksia on tehtävä kaikissa erilaisissa pohjaolosuhteissa, jotta voidaan varmistua paalujen riittävästä geoteknisestä kestävyydestä koko kohteessa.

Yhdistettäessä paalun vaippa- ja kärkekestävyys eri iskuista tulee tehdä signaalinmallinnus molemmille iskuille.

Paalun rakenteen kestävyyttä ei saa ylittää koekuormituksessa.

Paalujen dynaamista koekuormitusta suunniteltaessa on määritettävä mitattavien paalujen lukumäärä, jonka perusteella määräytyvät käytettävät korrelaatiokertoimet. Korrelaatiokertoimen, paalun kestävyysluokituksen osavarmuusluvun ja paalun mitoituskuorman tulon perusteella saadaan geoteknisen kestävyysluokituksen tavoitearvot, joihin dynaamisessa koekuormituksessa pyritään. Dynaamista koekuormitusta suunniteltaessa on syytä pohtia, koska koekuormitus suoritetaan. Tarvitaanko pidempi odotusaika, jossa maan lujuus ehtii palautumaan, vai voidaanko koekuormitus suorittaa heti paalun asennuksen jälkeen.

Lisäksi dynaamisen koekuormituksen suunnittelussa täytyy huomioida paalutyypin ja -materiaalien asettamat rajoitukset ja vaatimukset koekuormituksen suoritukselle.

2.2.1 Mitattavien paalujen valinta

Mitattaviksi paaluiksi kohteessa valitaan lähtökohtaisesti aina geoteknisen kestävyysluokituksen kannalta epäedullisimmat paalut. Toisin sanoen kohteessa mitataan ainakin paalut, joilla on suurin loppulyöntipainuma. Mittauksia on tehtävä kattavasti koko paalutettavalta alueelta. Varsinkin pohjasuhteiden vaihdellessa mittauksia on tehtävä kaikissa erilaisissa pohjaolosuhteissa, jotta voidaan varmistua paalujen riittävästä geoteknisestä kestävyydestä koko kohteessa. (Liikenneviraston ohjeita 35/2013).

Mitattavien paalujen lukumäärän, tai osuuden paalujen kokonaismäärästä, perusteella määritetään käytettävät korrelaatiokertoimet. Lukumäärä tai osuus kokonaismäärästä, n , tarkoittaa geoteknisen kestävyysluokituksen kannalta samankaltaisissa pohjasuhteissa tehtyjen samanlaisten paalujen mittausten määrää. Esimerkiksi sillan tuet käsitellään yleensä omina erillisinä kokonaisuuksinaan, joille määritetään oma lukumäärä tai osuus n . (Liikenneviraston ohjeita 35/2013). Pohjarakennesuunnittelija määrittää ennen koekuormitusta, miten n määräytyy.

Mitattavat paalut määrittää ensisijaisesti pohjarakennesuunnittelija, mutta mikäli suunnittelija ei ole määrittänyt mitattavia paaluja, valitaan mitattavat paalut työmaalla paalutusurakoitsijan / mittaajan toimesta. Jo suunnitteluvaiheessa tulisi suunnitella mitattavien paalujen sijainnit ja ajoittaa koekuormitukset ottaen huomioon paalutusalueen pohjaolosuhteet sekä paalujen toimintatapa.

Pohjarakennesuunnittelija, paalutusurakoitsija ja mittaaja toimivat yhteistyössä, jolloin voidaan optimoida kohteen paalutuksen toteutus. Tällöin voidaan esimerkiksi asentaa paaluja eri loppulyöntipainumaan ja mittauksien perusteella määrittää loppulyöntiehto kohteen muille paaluille.

2.2.2 Mittausajankohdan valinta

Tarpeen vaatiessa paalun asennuksen ja dynaamisen koekuormituksen väliin suositellaan jätettäväksi aika, jossa paalun asennuksesta aiheutunut huokosveden ylipaine ehtii purkautumaan ja maan lujuus palautuu paalun ympärillä. Erityisesti lyöntipaalaus häiritsee paalua ympäröivää maata voimakkaasti.

Normaalisti yksittäisillä paaluilla odotusaika on lyhyempi kuin paaluryhmillä. Vastaavasti pieniläpimittaisilla paaluilla odotusaika on lyhyempi kuin suuriläpimittaisilla paaluilla. Odotusaika on lisäksi vahvasti maalajista riippuvainen. Hienorakeisissa maissa vaadittu odotusaika on pidempi kuin karkearakeisissa maissa, koska hienorakeisissa maissa vedenjohtavuus on matalampi, ja siten paalutuksessa syntyneen huokosveden ylipaineen purkautumiseen kuluu pidempi aika ks. 2.2.3.

2.2.3 Paalutyypin ja -materiaalien ominaisuudet koekuormituksessa

Paalut voidaan jakaa toimintatapansa mukaan tukipaaluihin, kitkapaaluihin ja koheesiopaaluihin. Raja eri paalutyypin välillä voi kuitenkin olla epäselvä, koska edellä mainittujen toimintatapojen osuudet paalun geoteknisestä kestävydestä voivat vaihdella huomattavasti sekä pohja- että kuormitusolosuhteiden myötä.

Tukipaalujen dynaamiset koekuormitukset voidaan suorittaa yleensä heti paalun asentamisen jälkeen, eikä pidempiä odotusaikoja tarvita. Kitkapaaluilla suositeltu odotusaika on muutamasta päivästä kahteen viikkoon (Kinnunen, 2015), jonka aikana tyyppillisesti suurin osa vaippavastuksen pitkänajan kehityksestä tapahtuu. Koheesiopaaluilla täytyy usein asennuksen jälkeen odottaa vielä pidempään, muutamista viikoista kuukausiin, jotta vaippavastus ehtii kehittymään riittävästi.

Erityisesti pitkien kitkapaalujen sekä vaippa- että kärkekestävyyttä ei yleensä pystytä mobilisoimaan yksittäisellä koekuormitusiskulla, kun paalun vaippavastus on odotusajana kehittynyt. Tällöin pyritään ensin mobilisoimaan paalun vaippakestävyys yhdellä koekuormitusiskulla, jonka jälkeen paalun kärkekestävyys pyritään mobilisoimaan vaippavastuksen häiriintymisen jälkeen. Vaipan häiriintymiseen voidaan tarvita useampia iskuja. Lopuksi vaippa- ja kärkekestävyydet yhdistetään, jolloin saadaan paalun kokonaiskestävyys. Vaihtoehtoisesti paalun kärkekestävyys voidaan määrittää heti asennuksen jälkeen ja vaippakestävyys vasta odotusajan jälkeen. Signaalinmallinnus tulee tehdä molemmille iskuille, kun yhdistetään paalun vaippa- ja kärkekestävyys eri iskuista. Liitteessä 1 on esitetty esimerkki tapauksesta, jossa paalun geotekninen kestävyys on saatu yhdistämällä paalun kärki- ja vaippakestävyys eri iskuista.

Kärki- ja vaippakestävyys voidaan yhdistää, kun paalun kärjen voidaan olettaa sijaitsevan sellaisessa maakerroksessa, jossa ei esiinny relaksaatiota. Relaksaatiota esiintyy vedellä kyllästyneissä, tiiviissä, hienorakeisissa maissa, jotka laajenevat kuormitettaessa. Relaksaation seurauksena maassa esiintyy hetkellisesti negatiivista huokosveden painetta, jolloin yliarvioidaan paalun kärkekestävyyttä, joka on hetkellisesti korkeampi negatiivisen huokosveden paineen seurauksena.

Avoimen putken koekuormitus itsessään ei poikkea suljetun teräspuutken koekuormituksesta. Poikkeavuudet tulevat paalujen vetokestävyyttä määritettäessä. Asiaa on käsitelty tarkemmin luvussa 3 Signaalinmallinnus.

Toisaalta paalut voidaan jakaa myös asennustapansa mukaan esimerkiksi lyöntipaaluihin, kaivinpaaluihin ja porapaaluihin. Mittauksen suhteen paalut eivät poikkea toisistaan. Kaivinpaalujen dynaamisessa koekuormituksessa täytyy kuitenkin huomioida paalun rakenteen kestävyys, eli valettu betoni on saavuttanut riittävänä lujuuden ennen koekuormitusta, eikä sallittuja lyöntijännityksiä ylitetä koekuormituksessa. Lisäksi anturien asentamista varten on paalussa oltava riittävän tasainen pinta ja paalun yläpään pitää olla lyötävissä. Yläpäässä voidaan käyttää suojaputkea, mikäli raudoitusteräket tulevat valupinnan yläpuolelle.

Porapaalun kalliokontakti ei ole aina täysin varma, joten myös porapaaluille voidaan suorittaa dynaamisia koekuormituksia, joilla varmistetaan paalujen riittävästä geoteknisestä kestävyydestä (Alheid, et al. 2014). Porapaalujen dynaamisilla koekuormituksilla selvitetään paalun ja kallion kontakti, erityisesti jos epäillään, että porasoijaa on jäänyt paalun kärjen alapuolelle. Porapaalun kalliokontaktin osoittaminen tulee kysymykseen myös silloin, kun käytetään menetelmiä, joissa avarrinkruunu ei jää osaksi pysyvää rakennetta. Heikkolaatuisella tai ehjästä poikkeavalla kalliolla voidaan dynaamisella koekuormituksella osoittaa paalun geotekninen kestävyys. Ehjässä kalliossa paalun kestävyys on riippuvainen vain paalumateriaalin kestävyydestä.

Paalumateriaali on normaalisti terästä, teräsbetonia tai puuta. Teräspaalun mittaus on normaalisti yksinkertaista, koska materiaali on homogeenistä ja kestää käsittelyä ja lyömistä hyvin. Teräsbetonipaaluilla materiaali ei koskaan ole täysin homogeenista ja teräsbetoni on herkempi materiaali vaurioille. Puupaalujen käyttöä ei suositella pysyvinä kantavina pohjarakenteina. Mikäli puupaaluille tehdään dynaamisia koekuormituksia, täytyy paalun poikkileikkauksen vaihtelut ottaa huomioon, mikä voidaan tehdä vain signaalinmallinnuksen avulla.

Mikäli teräsputkipaalut on valettu betonilla ja betoni on kovettunut ennen dynaamisen koekuormituksen suorittamista, saattaa betoni halkeilla ja murtua koekuormituksessa, jos paalua joudutaan lyömään kovaa ja useasti. Paalua saatetaan joutua upottamaan syvemmälle, jos koekuormituksessa ei saavuteta vaadittua geoteknistä kestävyyttä. Tällöin valettu betoni todennäköisesti vaurioituu putken sisällä.

Muutoin teräsputkien valamien ei sinänsä aseta estettä dynaamisen koekuormituksen suorittamiselle. Mikäli putket valetaan ennen koekuormitusta, tulee varmistua siitä, että riittävä geotekninen kestävyys voidaan saavuttaa maltillisilla koekuormituskuilla. Vaihtoehtoisesti teräsputket voidaan täyttää myös puhtaalla vedellä koekuormituksen ajaksi, jotta putken massaa saadaan kasvatettua, joka vähentää paalun joustoa ja lyöntienergian tarvetta.

2.3 Mittauksen suoritus

Ohje

Mittauksen lähtötietona tarvitaan: paalutyyppi, paalun poikkileikkaus ja pituus, kärkityyppi, asennus- ja koekuormituskaluston tiedot, paalunumerot, paalujen asennuspäivämäärät ja lopetuslyönnit (painuma, kalusto, pudotuskorkeus/energia).

Mittaajalle tulee toimittaa ainakin kohteen paalukartta, geotekniset piirustukset sekä paalutuspöytäkirjat tulosten tulkintaa varten.

Mittaajan tulee tietää keskiarvo- ja minimivaatimukset paalujen mittaus-tuloksille ($R_{c,m}$ -arvot) sekä koekuormitettavien paalujen lukumäärä.

Anturit asennetaan paaluun paalupoikkileikkaukseen nähden kohtisuoraan toisiaan vasten, paalun pituusakselin suuntaisesti vähintään $1,5 \cdot D$ etäisyydelle paalun yläpäästä.

Dynaamisessa koekuormituksessa käytetään vähintään kahta venymä- ja kiihtyvyyssanturia. Kierresaumatuilla teräspalkkipaaluilla ja halkaisijaltaan yli 400 mm paaluilla käytetään neljää venymäanturia.

Kun anturit kiinnitetään apupaaluun, tulee tehdä signaalinmallinnus.

Koekuormituksessa paalussa esiintyvät jännitykset eivät ylitä taulukossa 2 esitettyjä sallittuja jännityksiä.

Paalun murtokuorman mobilisoimiseksi koekuormituksessa on saavutettava riittävä pysyvä painuma.

Tilanteesta ja paalun mitoituskuormasta riippuen, paalun kaikkea geoteknisen puristuskestävyyden kapasiteettia ei ole aina ole välttämätöntä ulosmitata, jolloin myös pienempi koekuormitusiskun pysyvä painuma voi olla riittävä.

Paalujen dynaamista koekuormitusta varten on oltava riittävät lähtötiedot koekuormitettavista paaluista. Koekuormitusta varten tarvitaan mittauslaitteiston lisäksi lyöntilaitte. Lyöntilaitteella tulee kyetä mobilisoimaan riittävä geotekninen kestävyys paaluille. Nyrkkisääntönä koekuormitusjärkälleen painolle voidaan pitää: Kallioon tukeutuvilla paaluilla järkälleen paino on vähintään 1 % paalun vaaditusta staattisesta vastuksesta ja kittamaakerroksiin tukeutuvilla paaluilla vähintään 2 % paalun vaaditusta staattisesta vastuksesta.

2.3.1 Lähtötiedot

Mittauksen lähtötietona tarvitaan:

- paalutyyppi,
- paalun poikkileikkaus ja pituus,
- kärkityyppi,
- asennus- ja koekuormituskaluston tiedot,
- paalunumerot,
- paalujen asennuspäivämäärät,
- lopetuslyönnit (painuma, kalusto, pudotuskorkeus/energia).

Mittaaja saa tarvittavat lähtötiedot ennen koekuormituksia toimitettavista asiakirjoista. Mittaajalle tulee toimittaa ainakin kohteen paalukartta, geotekniset piirustukset sekä paalutuspöytäkirjat. Lisäksi mittajaan tulisi tietää keskiarvo- ja minimivaatimukset paalujen mittaustuloksille ($R_{c,m}$ -arvot) sekä koekuormitettavien paalujen lukumäärä.

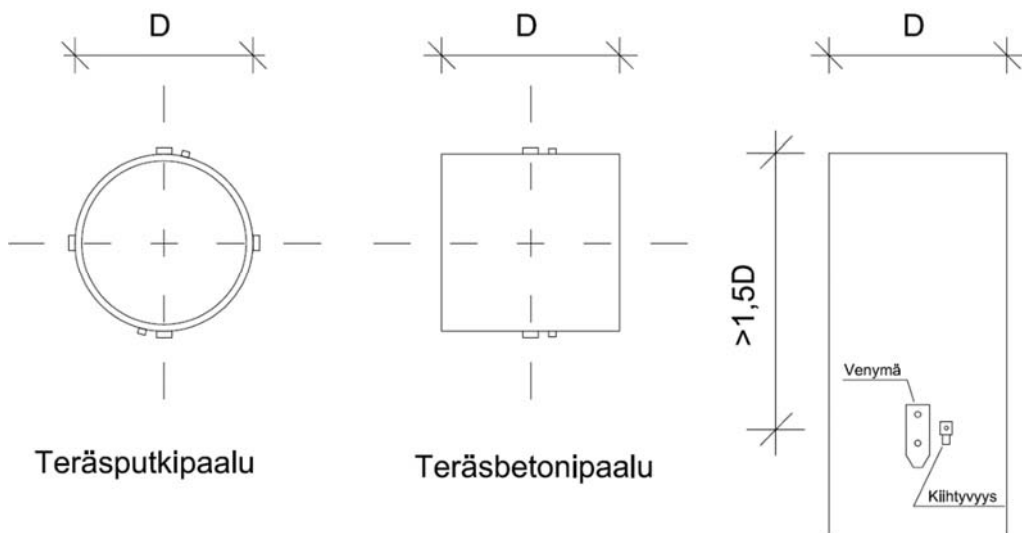
2.3.2 Anturit

Dynaamisessa koekuormituksessa voidaan käyttää sekä liimattavia että pultattavia venymäantureita. Yleensä käytetään kuitenkin pultattavia antureita. Liimattavia antureita käytetään silloin, kun käytetään esimerkiksi hydraulivasaroita, jolloin paaluun kohdistuu paljon lyönnejä. Liimattavat anturit pysyvät paremmin paalussa kiinni ja keveyden ansiosta kestävätkin suurempia nopeuksia paremmin kuin pultattavat anturit.

Paalujen dynaaminen koekuormitus ja ehjyysmittaus

Anturit asennetaan paaluun paalupoikkileikkaukseen nähden kohtisuoraan toisiaan vasten, paalun pituusakselin suuntaisesti. Anturit asennetaan vähintään $1,5 \cdot D$ etäisyydelle paalun yläpäästä, jolloin lyönnistä aiheutuneet jännitykset ehtivät tasoittua paalussa ennen kuin iskuaalto saavuttaa anturit. Normaalisti paalu menee lyöntilaitteen ohjurin sisään noin puoli metriä, pudotusjärkeillä noin metrin, joten anturit tulee asentaa paalussa myös tämän vuoksi riittävän etäälle paalun yläpäästä, etteivät anturit rikkoudu koekuormituksessa. Paaluihin on siis varattava riittävästi ylimääräistä kantoa koekuormituksia varten. Toisaalta, mikäli teräsbetonipaaluilla on useita metrejä ylimääräistä kantoa, on anturien asennus usein haastavaa. Teräsbetonipaaluissa pitkä kanto sisältää usein paljon halkeamia, joiden kohdalle antureita ei voida asentaa. Teräsbetonipaaluissa on nostolenkkien välissä halkeamia, joita syntyy paalun pystyyn nostamisen yhteydessä sekä vinopaaluja lyötäessä. Anturien asennuspaikat paalussa on esitetty kuvassa 5.

Dynaamisessa koekuormituksessa käytetään vähintään kahta venymä- ja kiihtyvyysanturia. Kierresaumatuilla teräspalkkipaaluilla ja halkaisijaltaan yli 400 mm paaluilla käytetään neljää venymäanturia (prEN ISO 22477-4; RIL 254-2011). Neljän venymäanturin avulla pystytään kohdistamaan lyöntilaitteen isku paaluun paremmin, jolla ehkäistään suurien jännityserojen syntyminen.



Kuva 5. Venymä- ja kiihtyvyysanturien asennuspaikat paaluissa.

Pulteilla kiinnitettäviä antureita varten paaluihin porataan reiät ja teräsbetonipaaluilla reikiin asennetaan kierteillä varustetut lyöntiankkurit. Teräspaaluilla porataan pulttien reiät, joihin tehdään kierteet. Puupaaluihin anturit kiinnitetään suoraan paaluun puuruuvien avulla. Anturien pultit kiristetään tarpeeksi kireälle, jotta anturit eivät luista koekuormituksessa. Anturien luistaessa mittaustuloksista tulee virheellisiä.

Anturien kiinnityksen jälkeen tarkistetaan, että mittauslaitteistolta on valittuna oikeat anturit, ja että antureille on asetettu kalibrointitodistuksien mukaiset kalibrointikertotimet. Antureiden kiinnityksen jälkeen varmistetaan, että anturit eivät ole valmiiksi liiallisessa puristuksessa tai vedossa.

Anturit voidaan asentaa myös erilliseen apupaaluun, joka asetetaan lyöntilaitteen ja paalun pään väliin. Instrumentoidun apupaalun impedanssin tulisi olla mahdollisimman lähellä varsinaisen lyötävän paalun impedanssia.

Instrumentoitua apupaalua käytettäessä antureita ei tarvitse kiinnittää erikseen jokaiseen paaluun ja säästyy aikaa antureiden asennuksessa. Mittauksessa apupaalu muuttaa hieman mittauskuvaaajien alkuiskuaallon muotoa ja kun anturit on kiinnitetty apupaaluun, tulee tällöin tehdä signaalinmallinnus.

2.3.3 Koekuormituslyönti

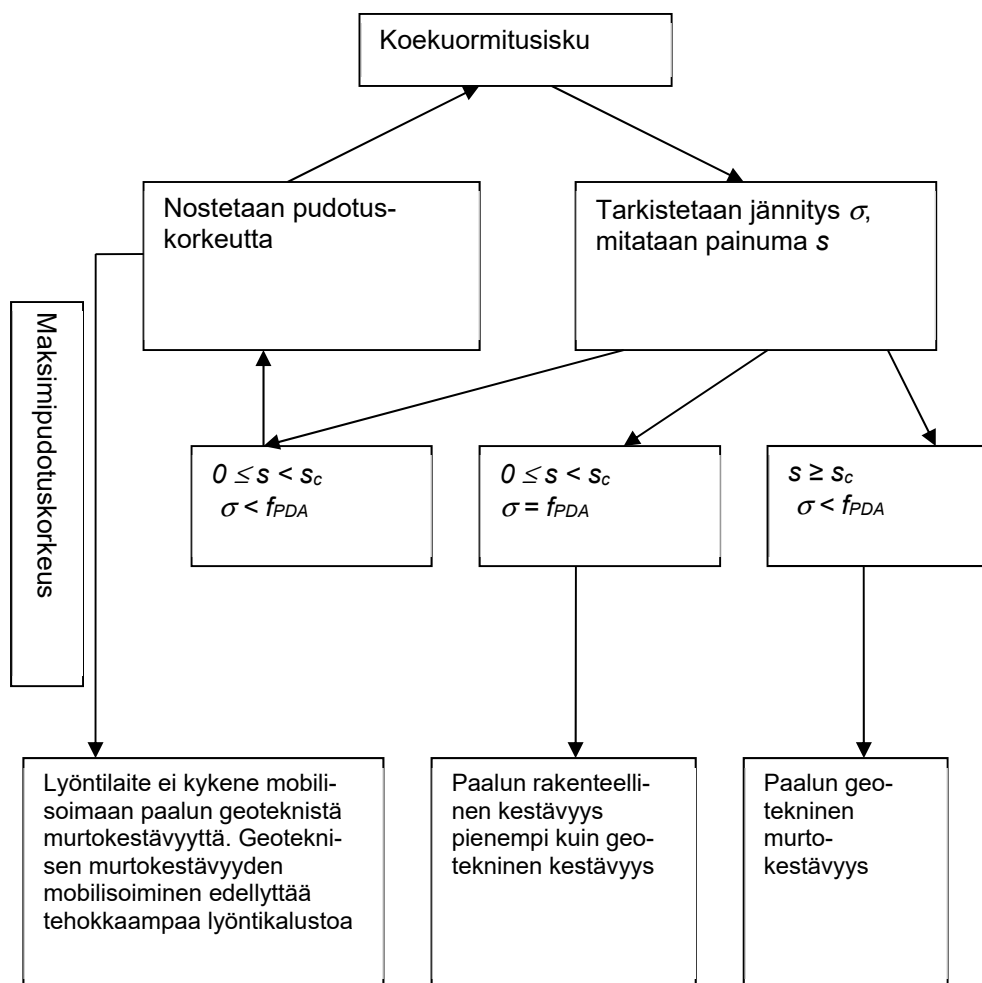
Ennen varsinaisia koekuormitusiskuja lyöntilaitteen lyönti kohdistetaan siten, että isku osuu keskeisesti paaluun päähän. Tämä tehdään matalilla kohdistuslyönneillä ja tarvittaessa paalutuskoneen keiliä käännetään, jotta lyöntilaite saadaan iskemään keskeisesti.

Tukipaaluilla varsinaiset koekuormitusiskut aloitetaan pudottamalla järkälettä tarpeeksi matalalta ja samalla tarkkaillaan mittalaitteelta paalussa esiintyviä jännityksiä. Mikäli paalussa esiintyvät jännitykset ovat sallittujen jännitysten alapuolella, eikä ole mobilisoitu paalun geoteknistä murtokestävyyttä, nostetaan pudotuskorkeutta. Tätä toistetaan kunnes riittävä geotekninen kestävyys on mobilisoitu tai paalun sallitut jännitykset saavutetaan. Kuvassa 6 on esitetty koekuormitusprosessin kulku ja taulukossa 2 paalujen sallitut lyöntijännitykset.

Kitka- ja koheesiopaalujen koekuormituksissa on tärkeää, ettei paalun vaippavastusta häiritä ennen varsinaista koekuormitusta. Kitka- ja koheesiopaaluille tehdään vain mahdollisimman kevyet kohdistusiskut ennen varsinaista koekuormitusiskua. Varsinaisella koekuormitusiskulla (sallittujen lyönninaikaisten jännitysten rajoissa mahdollisimman suurella iskulla) pyritään mobilisoimaan sekä paalun vaippa- että kärkikestävyys. Haastavissa tilanteissa iskutapahtuma voidaan mallintaa ennen koekuormitusta, jotta saadaan arvio paalussa esiintyvistä jännityksistä koekuormitustilanteessa.

Taulukko 2. Paalujen sallitut lyöntijännitykset (EN 12699).

Paalumateriaali	Suurin sallittu lyöntijännitys	Suurin sallittu lyöntijännitys jännityksiä mitattaessa
Teräs	$0,9 \times f_{yk}$	$1,2 \times 0,9 \times f_{yk}$
Teräsbetoni	$0,8 \times f_{ck}$	$1,1 \times 0,8 \times f_{ck}$
Puu	$0,8 \times f_{c,0,k}$	$1,1 \times 0,8 \times f_{c,0,k}$



Kuva 6. Koekuormitusprosessin kulku (RIL 254-2011). s = pysyvä painuma koekuormituksessa, s_c = pysyvä painuma, jolla paalun geotekninen murtokestävyys mobilisoituu, f_{PDA} = paalumateriaalin maksimijännitys dynaamisessa koekuormituksessa (taulukko 2).

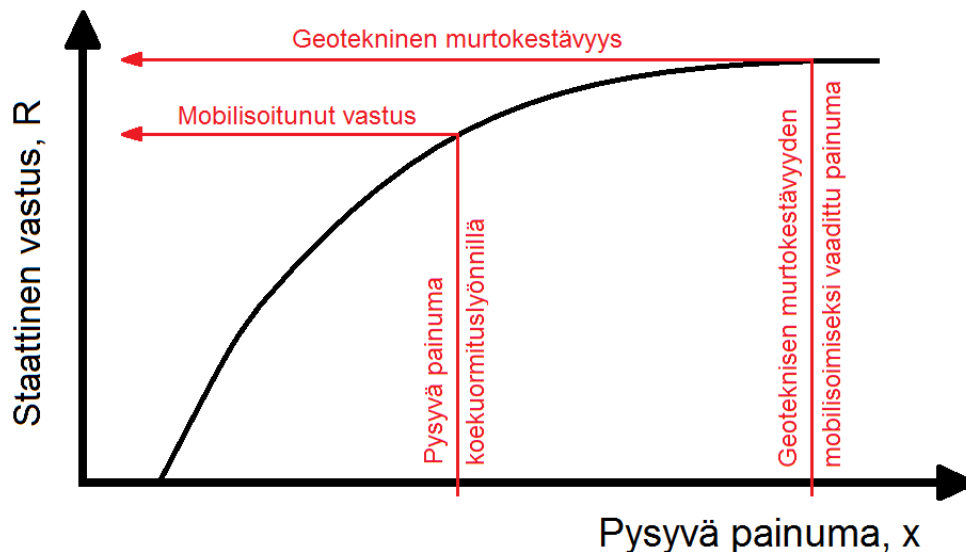
Dynaamisessa koekuormituksessa teräksen lujuutta ($0,9 \times f_{yk}$) voidaan kertoa kertoimella 1,2 ja betonilla sekä puulla puristuslujuutta ($0,8 \times f_{ck}$ tai $f_{c,0,k}$) voidaan kertoa kertoimella 1,1, koska lyöntijännityksiä tarkkaillaan koekuormituksessa. Sallitut arvot on esitetty taulukossa 2. Dynaamisessa koekuormituksessa teräkselle sallitaan suurempi jännitys kuin materiaalin ominaislujuus, koska kuormitusnopeudesta johtuen teräksen ”dynaaminen myötöraja” on suurempi kuin staattinen myötöraja.

Lyöntijännityksien pysyminen sallituissa rajoissa on joissakin tilanteissa kuitenkin haastavaa. Esimerkiksi teräsputkipaaluilla, joilla tulee osoittaa suuria geoteknisen kestävyysarvoja, kasvavat lyöntijännitykset herkästi taulukossa 2 esitettyjä sallittuja lyöntijännityksiä korkeammaksi. Erityisesti sellaisissa tilanteissa, joissa paalun yläpää on katkaistu työmaaolosuhteissa. Paalun päästä saadaan tällöin harvoin täysin suoraa, jolloin jännitykset eivät jakaannu tasaisesti paalun päässä ja jollakin reunalla paalussa esiintyy selkeästi korkeampia jännityksiä.

Mikäli lyöntilaitteen energia ei ole riittävä mobilisoimaan paalun geoteknistä murtokestävyyttä sallittujen lyöntijännitysten rajoissa, tulisi hankkia pudotusjärkele tai painavampi hydraulijärkele. Pudotusjärkelellä pystytään nostamaan järkäleen pudotuskorkeutta, jolloin lyöntienergia kasvaa samoin kuin järkäleen massaa kasvattamalla.

2.3.4 Geoteknisen murtokestävyyden arviointi

Koekuormitusiskuille mitataan paalun pysyvä painuma, jonka perusteella voidaan arvioida, onko paalun geotekninen murtokestävyys mobilisoitunut koekuormituksessa. Paalun oletetaan saavuttavan geoteknisen murtokestävyyden, kun paalulta mobilisoituva staattinen vastus ei enää kasva paalun pysyvän painuman kasvaessa suuremmalla koekuormitusiskulla. Kuvassa 7 on havainnollistettu geoteknisen murtokestävyyden mobilisoitumista.



Kuva 7. Paalun staattisen vastuksen mobilisoituminen koekuormituksessa aikaansaadun paalun pysyvän painuman suhteen.

Tilanteesta ja paalun mitoituskormasta riippuen, paalun kaikkea geoteknisen puristuskestävyyden kapasiteettia ei aina ole välttämätöntä ulosmitata, jolloin myös pienempi koekuormituslyönnin pysyvä painuma voi olla riittävä.

Paalun geoteknisen murtokestävyyden mobilisoimiseksi vaadittava pysyvä painuma on riippuvainen paalukoosta ja pohjasuhteista. Perinteisesti sen suuruudeksi on esitetty $s = 3\text{--}12\text{ mm}$. Vaikka tätä suurempia painumia ei ole tyypillisesti pidetty toivottavana, sen seurauksena mahdollisesti vaikeutuvan signaalinmallinnuksen vuoksi, on niiden mallintaminen myös mahdollista. (Pile Dynamics, Inc. 2014)

Paalun vaipan osalta 3 mm painumaa voidaan jo usein pitää riittävänä vaipalta tulevan vastuksen mobilisoimisessa kokonaisuudessaan. Paalun kärjen osalta 3 mm painuma on kuitenkin vielä pääsääntöisesti riittämätön paalun kärkivastuksen murtokestävyyden täydelliseen mobilisoimiseen.

Eri kohteissa paalujen ($\varnothing \leq 914\text{ mm}$) dynaamisia ja staattisia koekuormitustuloksia vertaillen alle 12 mm pysyvää painumaa vastaavat dynaamisten koekuormitusten tulokset ovat olleet kuitenkin vielä keskimäärin melko konservatiivisia (Likins & Rausche, 2008). Likins & Rausche (2004) keräämän toisen aineiston mukaan 20 mm pysyvällä painumalla on useissa kohteissa saavutettu hyvä korrelaatio staattisen ja dynaamisen koekuormituksen välillä. Lisäksi tulee huomioda, että dynaamisen koekuormituksen tuloksia verrataan tyypillisesti Davissonin kriteeriin (SFS-EN 1997-1), joka jo sekin on itsessään keskimääräistä konservatiivisempi menetelmä staattisen koekuormituksen tulosten tulkintaan (Likins & Rausche, 2004).

Koska paalun kärjen geoteknisen murtokestävyyden mobilisoimiseksi vaaditun pysyvän painuman suuruus voi vaihdella paalukoon lisäksi kohteen pohjaolosuhteista riippuen, on yleispätevän kriteerin antaminen haastavaa. Tukipaalujen kärjen pysyvän painuman suuruuden voidaan kuitenkin kokemuseräisesti arvioida olevan tyypillisesti noin $5 \text{ mm} + d/100$, missä d on paalun halkaisija.

2.4 Iskuaaltokuvaajien tulkinta

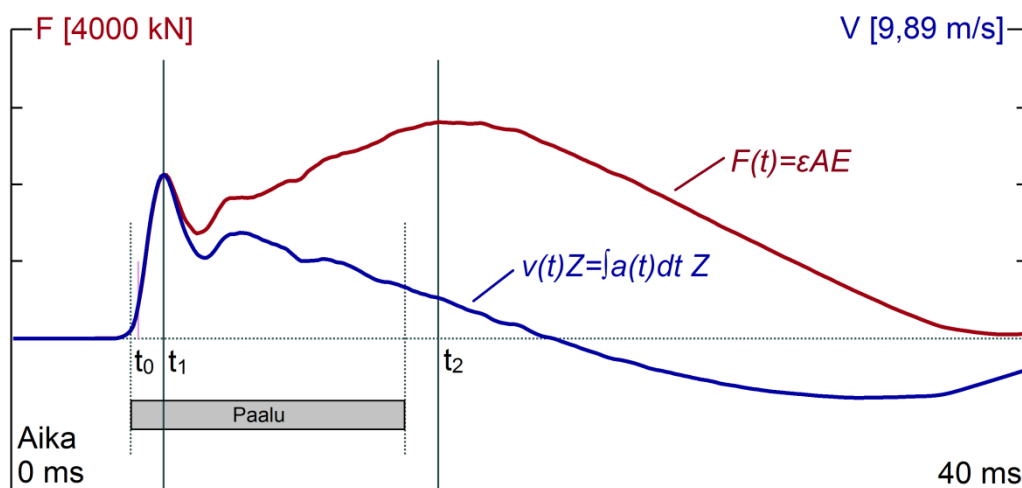
Kappaleessa on käsitelty dynaamisen koekuormituksen tulosten kannalta oleellisia kuvaajia sekä niiden tulkintaa. Kuvaajissa on käsitelty tyypillisiä koekuormituksissa esiintyviä tilanteita.

Alempana on käsitelty lisäksi olosuhteita ja tekijöitä, jotka vaikuttavat heikentävästi mittaussignaalin laatuun ja tulkittavuuteen. Aina kaikkia mittaukseen vaikuttavia tekijöitä ei voida mittausten yhteydessä täysin ottaa huomioon, mutta niiden vaikutusten laajuus ja vakavuus on hyvä tunnistaa ja huomioida tuloksia tulkitessa.

2.4.1 Voima- ja nopeussignaali kuvaaja

Paalun yläpäästä venymäantureilla mitattu muodonmuutos ε muutetaan keskimääräiseksi voimaksi paalun poikkileikkauksen pinta-alan A ja kimmomoduulin E avulla, ja esitetään ajan funktiona kuvan 7 mukaisesti (punainen viiva). Vastaavasti nopeus (sininen viiva) saadaan mitatun kiihtyvyyden integraalina ajan suhteen. Mikäli iskuaalto kulkee ainoastaan alaspäin, eikä heijastuksia ole, ovat voima $F(t)$ ja nopeus $v(t)$ yhdenmittaisia $F(t) = v(t)Z$.

Tällainen tilanne syntyy käytännössä, kun paalutuskoneen lyöntilaitteen aiheuttama iskuaalto ohittaa anturit ensimmäisen kerran. Tällöin voiman ja nopeuden funktiot kulkevat kuvaajassa päällekkäin kuvaajan ensimmäisen huipun kohdalla, ajanhetkellä t_1 , kuvan 8 tapaan.



Kuva 8. Paalusta mitatun voiman ja nopeuden funktiot.

Voiman ja nopeuden yhdenmittaisuutta kuvataan fvp-arvolla (force-velocity proportionality, nimi voi poiketa laitevalmistajasta riippuen), joka kuvaa voiman ja nopeuden suhdetta F/V ajanhetkellä t_i . Kuvassa 8 fvp saa arvon 1, koska voima ja nopeus ovat yhtä suuret ajanhetkellä t_i . Käytännössä täydellistä voiman ja kiihtyvyyden yhdenmittaisuutta ei koekuormituksessa aina saavuteta. Lievä poikkeama voiman ja nopeuden yhdenmittaisuudessa ei kuitenkaan tarkoita heikkolaatuista mittausta. Tyypillisesti noin 10 % ero voiman ja nopeuden kesken ($fvp=0,9\dots1,1$) on vielä hyväksyttävä.

Voiman ja nopeuden yhdenmittaisuutta voivat heikentää:

Kahden vastakkaisen voima-anturin perusteella määritetty paalun poikkileikkauksen keskimääräinen voima.

Mikäli paalun koekuormitusisku on voimakkaasti epäkeskeinen, painottuen jommalle-kummalle niistä paalun sivuista, joissa voima-antureita ei ole, on mitattu keskimääräinen voima todellista pienempi. Tällöin fvp-arvo voi laskea hieman alle yhden, mutta yksistään tämän vaikutus on vähäinen.

Voima-anturit eivät ole täysin vastakkain.

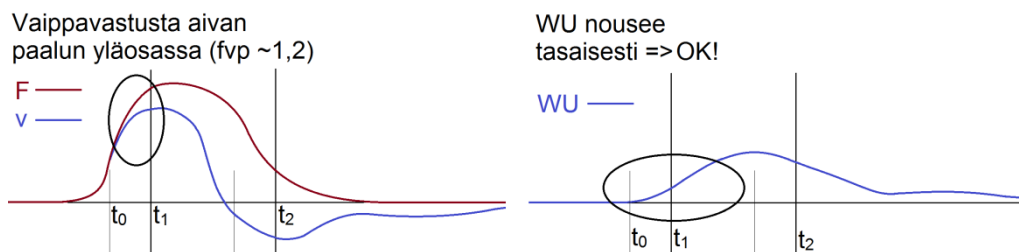
Tällöin epäkeskeisestä iskusta aiheutuva virhe paalun poikkileikkauksen keskimääräiseen voimaan kasvaa. Vaikutus on kuitenkin yksistään vähäinen, mikäli anturit on asennettu mittanauhatarckuudella vastakkain.

Anturit lähellä paalujatkosta.

Impedanssin muutos jatkoksessa voi heikentää fvp-arvoa, mikäli anturit joudutaan asentamaan koekuormitustilanteessa lähelle paalun jatkosta.

Anturit lähellä maanpintaa ja voimakas vaippavastus paalun yläosassa.

Paalun vaipalta heijastuvat puristusaallot näkyvät voiman ja nopeuden kuvaajien erkanemisena jo ennen ajanhetkeä t_i , jolloin fvp saa arvon ≥ 1 . Voimakkaan vaippavastuksen tapauksessa fvp voi olla $\sim 1,2$. Mikäli ylöspäin kulkevan voiman funktio WU nousee ajanhetken t_0 jälkeen tasaisesti eikä siinä ole jyrkkiä portaita, on voiman ja nopeuden yhdenmittaisuus hyvä heikosta fvp-arvosta huolimatta, kuten kuvassa 9. Ylöspäin kulkevaa voimaa ja vaippavastuksen havaitsemista on käsitelty tarkemmin kohdissa 2.4.2 ja 2.4.6.



Kuva 9. Voiman ja nopeuden yhdenmittaisuus.

Hiushalkeama betonipaalussa yhden tai useamman voima-anturin kohdalla.

Koekuormituslyönnillä halkeama menee umpeen ja paalusta mitatun muodonmuutoksen perusteella määritetty voima tulee liian suureksi. Työmaalla kirkkaassa päivänvalossa tällainen halkeama on mahdollista erottaa kuivasta paalun kyljestä visuaalisesti. Muuten halkeaman erottaminen paljaalla silmällä on vaikeaa, mutta sen olemassaolo voidaan tyypillisesti päätellä jälkikäteen poikkeuksellisen korkeasta fvp-arvosta $\geq 1,5$. Tällaisessa tapauksessa mittaustulos ei ole enää luotettava.

Signaalinmallinnusta vaativat fvp-poikkeamat:

Paalun poikkileikkaus muuttuu.

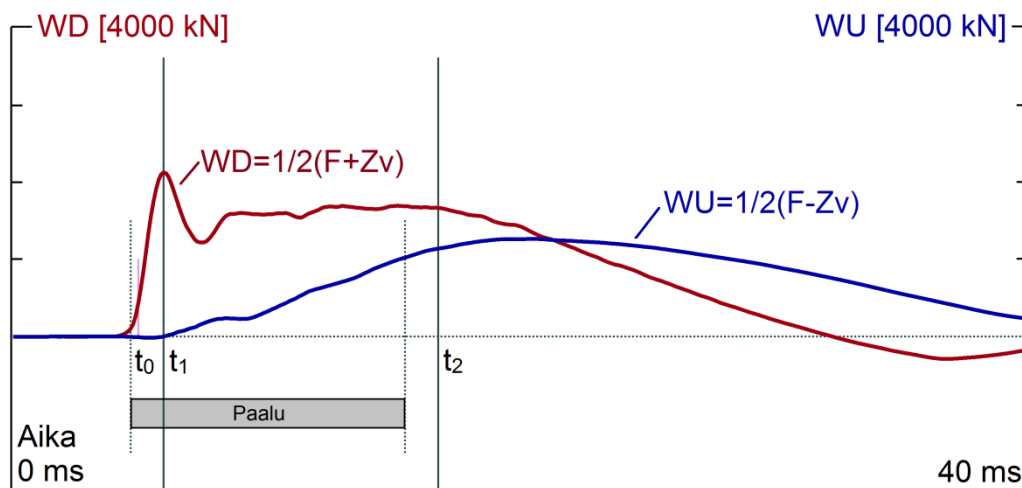
Signaalinmallinnus tulee tehdä aina paaluille, joiden poikkileikkaus ei ole vakio koko paalun matkalta paalun kärkeä ja jatkoksia lukuun ottamatta. Poikkileikkaus voi muuttua esimerkiksi tilanteessa, jossa teräsputkipaalussa on yhdistetty kahdella eri seinämävahvuudella olevaa putkea. Mikäli sauma sijaitsee lähellä paalun kärkeä, näkyy impedanssin muutos myös voiman ja nopeuden yhdenmittaisuudessa.

Mittausanturit kiinnitetään apupaaluun.

Jos koekuormituksessa käytetään hyväksi apupaalua, on koekuormituksesta tehtävä signaalinmallinnus.

2.4.2 Ylöspäin ja alaspäin kulkeva voima

Kokonaisvoima ja -nopeus paalun poikkileikkauksessa saadaan superpositioperiaatteen perusteella laskemalla yhteen ylös- ja alaspäin kulkevat voimat ja nopeudet aiemmin luvussa 2.1.1. esitetyn mukaisesti, mistä voitiin edelleen johtaa kuvan 10. mukaiset funktiot ylös- ja alaspäin kulkevalle voimalle (kuvassa WU ja WD).



Kuva 10. Paalusta mitattu ylös- ja alaspäin kulkeva voima.

Siinä missä alaspäin kulkeva voima (WD) on riippuvainen lyöntilaitteesta ja sen synnyttämästä koekuormituslyönnistä, ylöspäin kulkeva voima (WU) muodostuu ainoastaan paalun ja maan vuorovaikutuksesta. Ylöspäin kulkevan aallon muodosta voidaan helposti havaita mahdolliset vauriot paalussa sekä arvioida paalun vaipalta tai kärjeltä tulevaa vastusta. Näitä aiheita on käsitelty tarkemmin kohdissa 2.4.4–2.4.7.

2.4.3 Energia ja siirtymä

Lyöntilaitteen liikkuvanosan potentiaalienergia E_p on yläasennossa yhtälön 2.22 mukainen.

$$E_p = F \cdot h = m \cdot a \cdot h \quad (2.22)$$

F = liikkuvaan osaan vaikuttava voima

h = pudotuskorkeus

m = liikkuvanosan massa

a = liikkuvanosan kiihtyvyys

Lyöntilaitteella lyödessä liikkuvan osan potentiaalienergia muuttuu liike-energiaksi E_l yhtälön 2.23 mukaisesti.

$$E_l = \frac{1}{2} m \cdot v^2 = m \cdot a \cdot h \quad (2.23)$$

Yhtälön 2.23 perusteella liikkuvan osan liike-energia eli lyöntilaitteen lyöntienergia riippuu liikkuvan osan massasta ja loppunopeudesta, jolla liikkuva osa iskeytyy iskutyyn. Yhtälöstä 2.23 saadaan ratkaistua lyöntilaitteen liikkuvan osan loppunopeus, joka riippuu yhtälön 2.24 mukaisesti liikkuvan osan kiihtyvyydestä sekä pudotuskorkeudesta.

$$v = \sqrt{2 \cdot a \cdot h} \quad (2.24)$$

Vapaapudotusjärkäleillä järkäleen kiihtyvyys ei nimestään huolimatta vastaan täysin gravitaatiokiihtyvyyttä $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ vaan se on tyypillisesti hieman alhaisempi pääosin lyöntilaitteen osien välisestä kitkasta johtuen. Lyöntilaitteen liikkuvan osan kiihtyvyyttä voidaan parantaa kuitenkin esimerkiksi hydraulisesti. Hydraulijärkäleillä kiihtyvyyteen suuruus vastaa tyypillisesti kitkasta aiheutuvaa häviötä.

Itse lyöntilaitteessa tapahtuvien energiahäviöiden lisäksi lyöntienergiaa häviää lyöntilaitteen ja paalun rajapinnassa, johtuen mm. iskutyynyn ja iskusuojan sisäisestä kitkasta sekä rajapintojen epäkeskeisestä kontaktista, eikä liikkuvan osan liike-energia koskaan siirry täysimääräisesti paaluun.

Paalujen asennukseen Suomessa tyypillisesti käytettävillä suurimmilla hydraulijärkäleillä (maksimipudotuskorkeus 1,5 m, liikkuvan osan paino 9000 kg) paaluun on mahdollista saada siirtymään energiaa enimmillään noin 130 kNm. Vapaapudotusjärkäleillä päästään noin 400-500 kNm asti suuremman pudotuskorkeuden ansiosta. Lyöntilaitteen todellinen lyöntienergia riippuu aina myös ympäristön olosuhteista sekä lyöntilaitteen kunnosta.

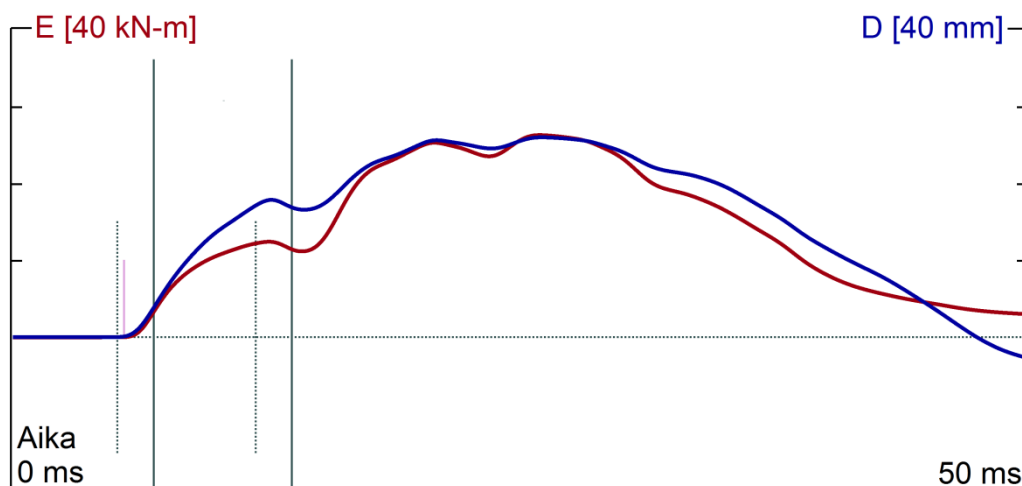
Paaluun siirtyvää energiaa E pystytään parhaiten arvioimaan yhtälön 2.25 mukaisesti määrittämällä paalun kohdistuva työ W , jonka voima F tekee liikuttamalla paalua siirtymän D verran. Paaluun siirtymä D saadaan laskettua edelleen kertomalla nopeus v ajalla t .

$$E = W = F \cdot D = F \cdot v \cdot t \quad (2.25)$$

Paaluun siirtymä energia lasketaan koko mittaushetken ajalta yhtälön 2.26 tapaan.

$$E = \int F \cdot v \cdot dt \quad (2.26)$$

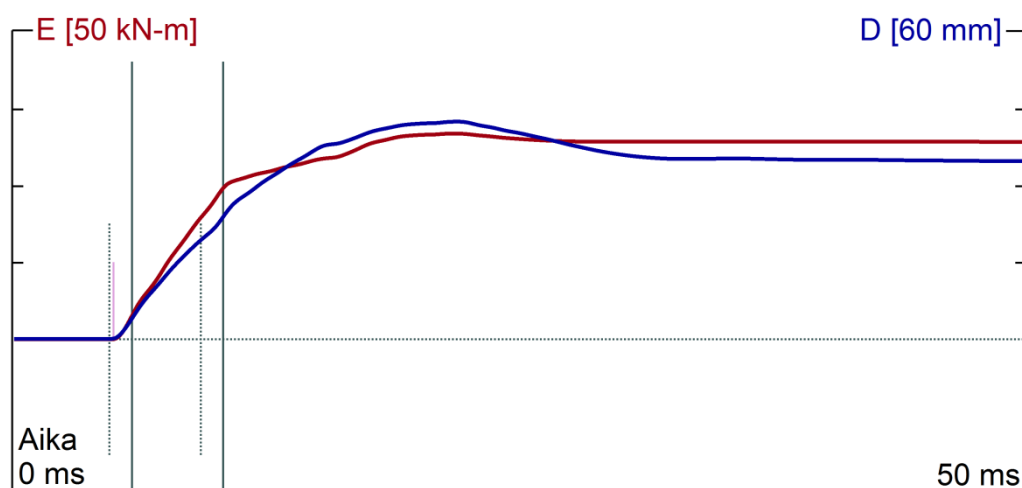
Kuvissa 11 ja 12 on esitetty paalun yläpäästä mitatun voiman ja nopeuden mukaan määritettyjä paaluun siirtyneitä energioita E (punainen viiva) ja paalun yläpäähän siirtymiä D (sininen viiva) ajan t suhteen. Kuvissa positiivinen suunta on ylöspäin, joka vastaa paalun päään siirtymistä alaspäin.



Kuva 11. Kärjeltään kallioon tai erittäin tiiviiseen kerrokseen tukeutuvan paalun energia- ja siirtymäkuvaaja.

Kuvan 11 paalu tukeutuu kallioon tai erittäin tiiviiseen moreeniin. Kuvan perusteella paaluun siirtyy energiaa 26 kNm, joka saa paalun yläpään siirtymään ensin 26 mm alas-päin. Siirtymä koostuu paalun kimmoisesta kokoonpuristumisesta, sekä paalun kärjen alla olevan maan kimmoisesta sekä plastisesta muodonmuutoksesta. Tämän jälkeen paalun yläpää nousee takaisin ylöspäin, jolloin paalu tekee työtä ja paalusta poistuu energiaa. Koska paalun yläpää palaa käytännössä alkuperäiseen tilaan, ovat kaikki muodonmuutokset olleet kimmoisia ja paalusta poistuu lähes kaikki siihen lyönnin aika-kana varastoitunut energia.

Kuvan 12 paalun lyöntivastus on puolestaan erittäin pieni. Tällöin kimmoiset muodonmuutokset ovat pieniä ja siirtymän maksimi, 42 mm, vastaa lähes kokonaisuudessaan paalun pysyvää painumaa. Paalusta ei poistu juurikaan energiaa, koska lähes kaikki lyöntienergia kuluu plastisiin muodonmuutoksiin.



Kuva 12. Kärjeltään löyhään kerrokseen tukeutuvan paalun energia- ja siirtymäkuvaaja.

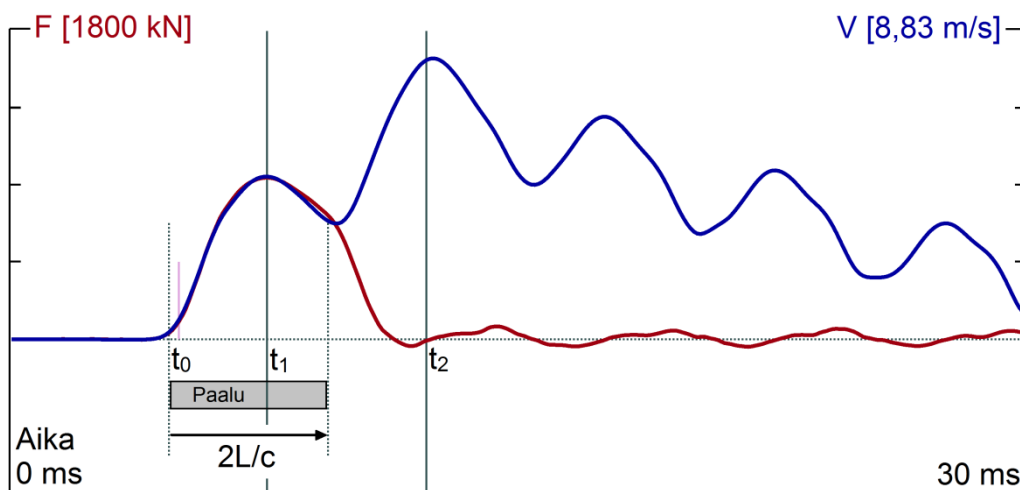
Energia ja siirtymäkuvaajia tulkitessa tulee huomioida, että siirtymää ja energiaa määrittäessä mitattu kiihtyvyys integroidaan kahteen kertaan, jolloin kiihtyvyyssignaalin olevat epätarkkuudet korostuvat siirtymä- ja energiakuvaajien loppupäässä.

2.4.4 Paalun kärjen tulkitseminen

Paalun kärki voidaan havaita ja sen käyttäytymistä koekuormituksessa tulkita sekä voima-nopeus- (FV) ja ylöspäin kulkevan voiman (WU) kuvaajasta. Iskuaalto etenee paalun päästä kärkeen ja heijastuu takaisin paalun yläpäähän. Aikaa tähän kuluu $2L/c$ verran. Paalun kärjen pitäisi näkyä siis kuvaajissa ajanhetkellä t_0+2L/c , missä L on mitausantureiden etäisyys paalun kärjestä ja c on iskuaallonnopeus paalussa.

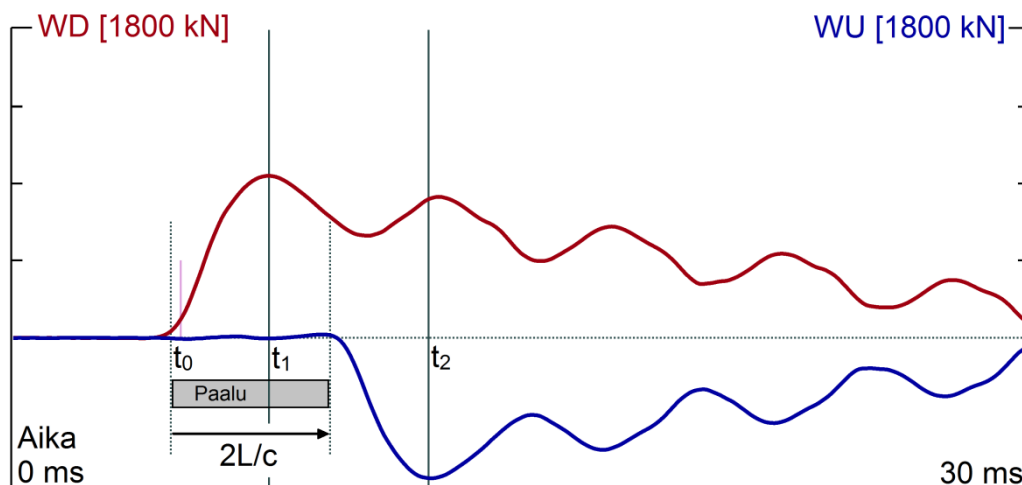
Paalun kärki tukeutuu löyhään kerrokseen

Kun paalua lyödään, paalu kokoonpuristuu ja paalun yläpää siirtyy alaspäin. Puristusaalto etenee L/c aikana paalussa alaspäin paalun kärkeen. Jos paalun kärki tukeutuu löyhään maakerrokseen eikä paalun kärjen alla ole vastusta, siirtyy paalun kärki alaspäin. Tällöin nopeus paalun kärjessä ajanhetkellä t_0+2L/c kasvaa ja voima laskee. Mikäli kärjen alla oleva vastus on olemattoman pieni, voima laskee paalun kärjessä nol- laan ja nopeus kaksinkertaistuu kuvan 13 mukaisesti. Tällaisessa tilanteessa paalun kärjestä heijastuva puristusaalto muuttuu vetoaalloksi, joka heijastuu takaisin kohti paalun yläpäätä. Savuttaessa paalun pään, vetoaalto vetää paalun yläpäätä alaspäin ja paaluun syntyy pysyvä painuma.



Kuva 13. Paalusta mitatun voiman ja nopeuden funktiot, kun paalun kärki tukeutuu erittäin löyhään kerrokseen.

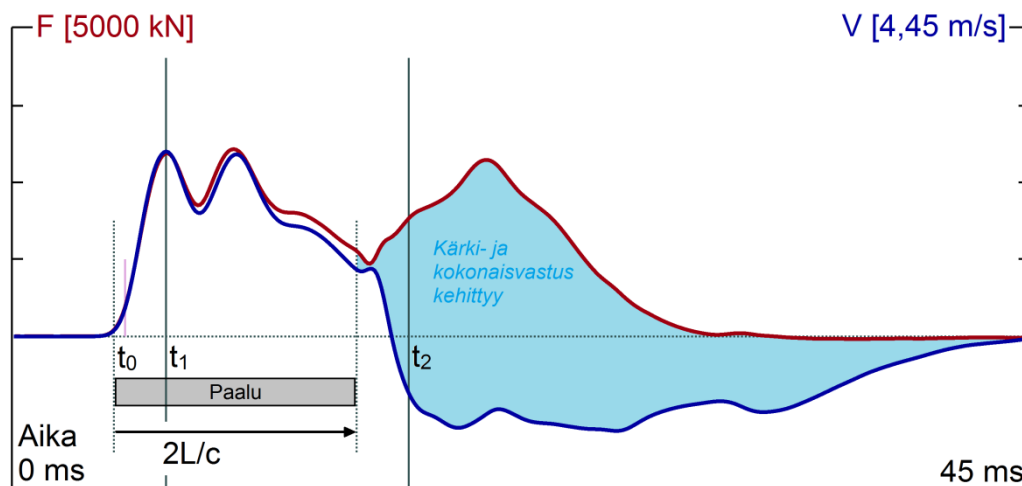
Kun paalun kärki tukeutuu löyhään maakerrokseen, jossa vastus on vähäinen, paalun kärjessä nopeus siis kasvaa ja voima pienenee. Tällöin ylöspäin kulkevan voima (kuvassa 14 sininen viiva) WU muuttuu negatiiviseksi kärjen kohdalla, ajan hetkellä t_0+2L/c .



Kuva 14. Paalusta mitattu ylös- ja alaspäin kulkeva voima, kun paalun kärki tukeutuu erittäin löyhään kerrokseen.

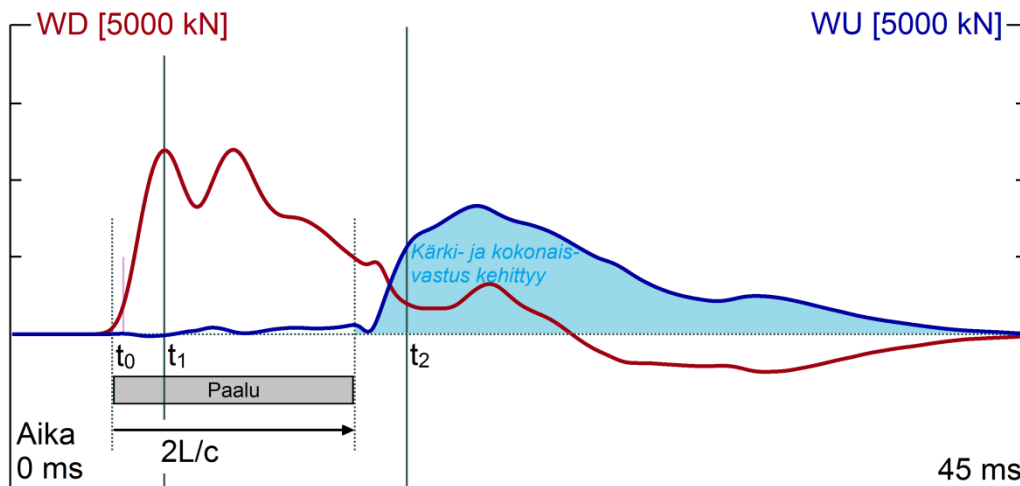
Paalu kärki tukeutuu kovaan maakerrokseen

Lyötäessä paalua, jonka kärki tukeutuu tiiviiseen kantavaan maakerrokseen tai kallioon, paalun kärki ei pääse samalla tavalla painumaan tulevan puristusaallon vaikutuksesta vaan paalun kärki puristuu kasaan. Tällöin voima paalun kärjessä kasvaa ja nopeus laskee kuvan 15 tapaan. Teoriassa voima paalun kärjessä kaksinkertaistuu ja nopeus putoaa nollaan, mikäli kärki ei pääse painumaan yhtään. Lyhyillä paaluilla voima voi käytännössä kertautua yli kaksinkertaiseksi, mikäli iskuaalto ehtii heijastua paalun varressa edestakaisin ennen lyönti-impulssin päättymistä.



Kuva 15. Paalusta mitatun voiman ja nopeuden funktiot, kun paalun kärki tukeutuu tiiviiseen kerrokseen.

Kuvan 16 ylöspäin kulkevassa voimassa paalun kärjestä tuleva suuri vastus näkyy kuvaajan jyrkkänä ja voimakkaana nousuna ajan $2L/c$ jälkeen.



Kuva 16. Paalusta mitattu ylös- ja alaspäin kulkeva voima, kun paalun kärki tukeutuu tiiviiseen kerrokseen.

Aallonnopeus paalussa

Iskuaallonnopeus voidaan laskennallisesti määrittää kimmomoduulin ja tiheyden perusteella kaavan 2.5 mukaan.

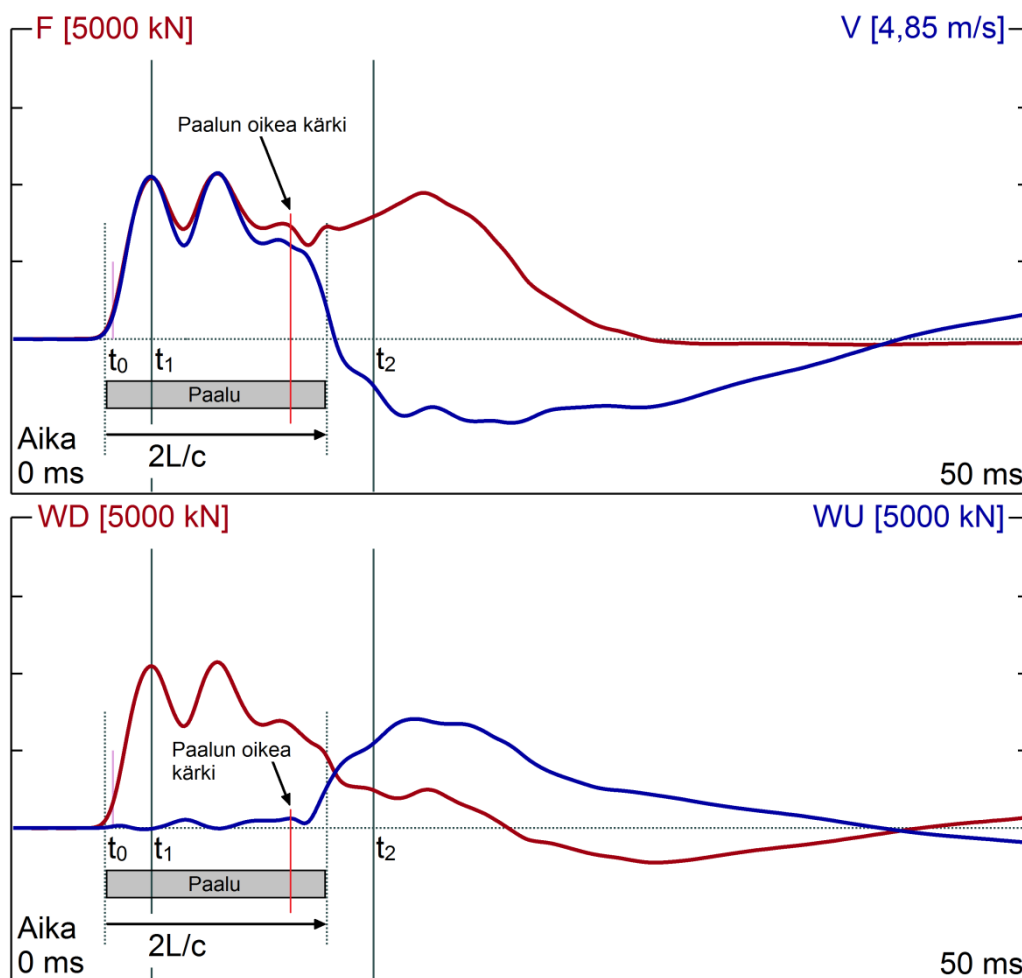
Teräksen kimmomoduulin 210000 MPa ja tilavuuspainon 7850 kg/m³ perusteella teräsputkipaalulla aallonnopeudeksi saadaan 5122 m/s. Tätä aallonnopeuden vakioarvoa voidaan käyttää aina teräsputkipaaluja mitatessa ja paalun kärjen sijainnin tulkitsemisen kuvaajista on täten yksiselitteistä.

Teräsbetonipaalun kimmomoduuli ei ole vakio. Betonin laadusta riippuen teräsbetonipaalun aallonnopeus vaihtelee noin 3200-4500 m/s välillä. Sen lisäksi, että aallonnopeus vaihtelee paalujen kesken, voi aallonnopeus vaihdella myös saman paalun sisällä. Aallonnopeus voi olla eri paalun ylä- ja alaosassa. Tämä ero voi olla hyvinkin suuri, mikäli kyseessä on jatkopaalu, jonka elementit ovat eri-ikäisiä. Lisäksi paalun asennuksen aikainen käsittely ja suuri lyöntimäärä voivat aiheuttaa paalun materiaalin rakenteeseen muutoksia, jotka vaikuttavat aallonnopeuteen paalussa. Nämä rasituksesta aiheutuvat muutokset voivat kohdistua voimakkaammin eri osiin paalua ja siten vaikuttaa aallonnopeuteen vain tietyssä kohtaa paalua. Tällöin paalun päästä koekuormitusmittausten perusteella määritetty aallonnopeus ei täsmää paalun pituuden kanssa ja ajan $2L/c$ perusteella määritetty ajanhetki t_2 on väärä ja sitä myötä myös CASE-menetelmän mukainen estimaatti paalun geoteknisestä kestävyydestä on virheellinen. Tämän vuoksi teräsbetonipaaluja mitattaessa aallonnopeudelle tarvitaan kaksi arvoa, paikallinen aallonnopeus antureiden kohdalla WS ja paalun keskimääräinen aallonnopeus WC. Mittauksessa lähtöoletuksena on aina, että paikallinen ja keskimääräinen aallonnopeus ovat yhtä suuret $WS=WC$.

Paalun paikallinen aallonnopeus WS antureiden kohdalla määritetään niin, että voima ja nopeus ovat ajanhetkellä t_i yhdenmittaiset, kuten luvussa 2.4.1 on esitetty. Jos paalun betoni on tasalaatuaista koko paalun matkalla, pitää lähtöoletus $WS=WC$ paikkansa ja paalun kärjen pitäisi sijoittua kuvaajissa hetkeen t_0+2L/c kuten aiemmin kuvissa 13-16.

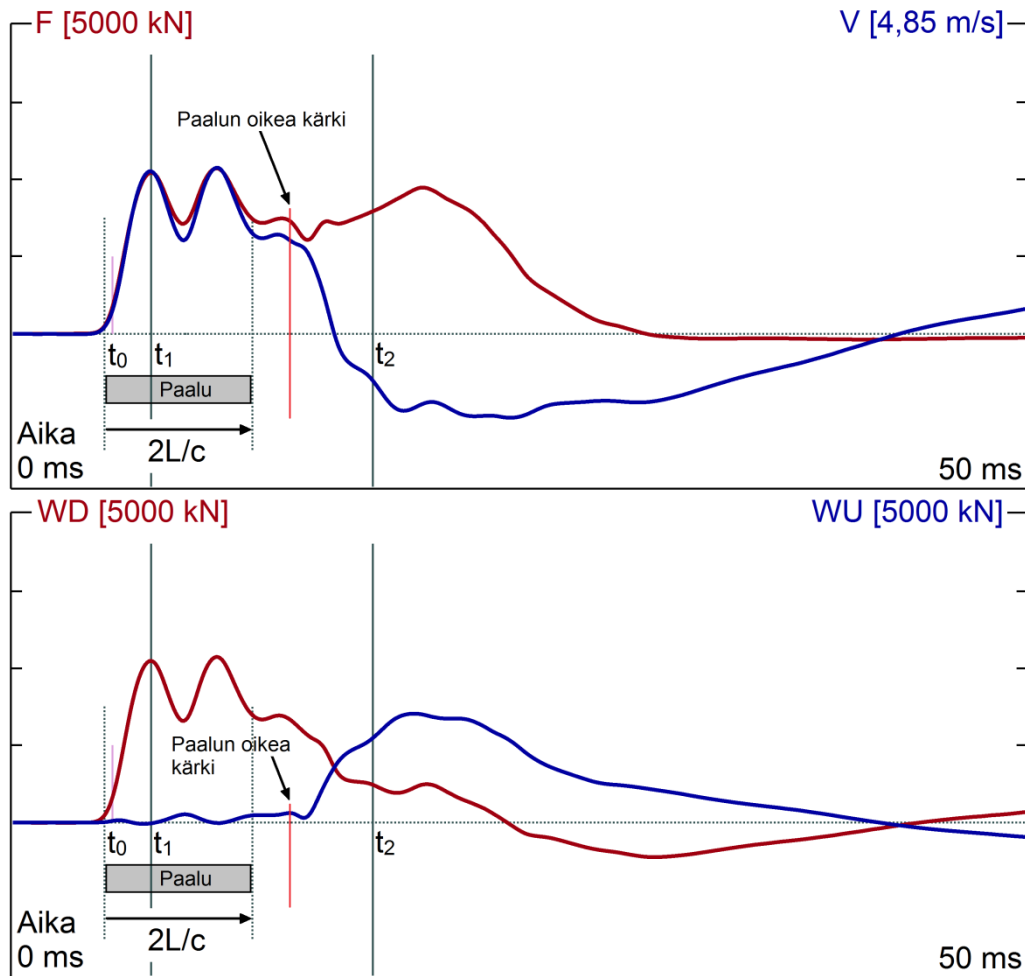
Paalujen dynaaminen koekuormitus ja ehjyysmittaus

Kun paikallinen aallonnopeus antureiden kohdalla onkin todellisuudessa alhaisempi kuin paalun keskimääräinen aallonnopeus ($W_S < W_C$), näkyy paalun kärki virheellisesti jo ennen ajanhetkeä $t_0 + 2L/c$ kuten kuvassa 17. Jotta paalun kärki saataisiin kohdalleen, tulisi paalun keskimääräistä aallonnopeutta korjata suuremmaksi.



Kuva 17. Aika $2L/c$ tulee liian pitkäksi, jos paalun keskimääräinen aallonnopeus on liian pieni.

Kuvan 18 kaltaisissa tapauksissa, joissa paalun paikallinen aallonnopeus antureiden kohdalla on suurempi kuin paalun keskimääräinen aallonnopeus, paalun kärki näkyy kuvaajissa vasta ajan $2L/c$ jälkeen, mikäli keskimääräistä aallonnopeutta ei korjata pienemmäksi.



Kuva 18. Aika $2L/c$ jää liian lyhyeksi, jos paalun keskimääräinen aallonnopeus on liian suuri.

2.4.5 Jousto paalun kärjessä

Paalun kärjessä syntyy voimakasta joustoa, kun paalu ja maa puristuvat tilapäisesti kokoon lyönnin seurauksena ja palautuvat lähes alkuperäiseen tilaan lyöntilaitteen kuormituksen poistuttua. Voimakasta joustoa esiintyy tyypillisesti maata syrjäyttävillä paaluilla, jotka tukeutuvat kärjeltään vedellä kyllästyneeseen, lujaan maakerrokseen, jossa vedenjohtavuus on heikko. Eli käytännössä tiiviiseen, runsaasti hienoaainesta sisältävään, moreeniin. Ilmiö on voimakkainta paaluilla, joiden tilavuus on suuri suhteessa niiden massaan eli esimerkiksi suuriläpimittaisilla, kärjestään suljetuilla, teräsputkipaaluilla.

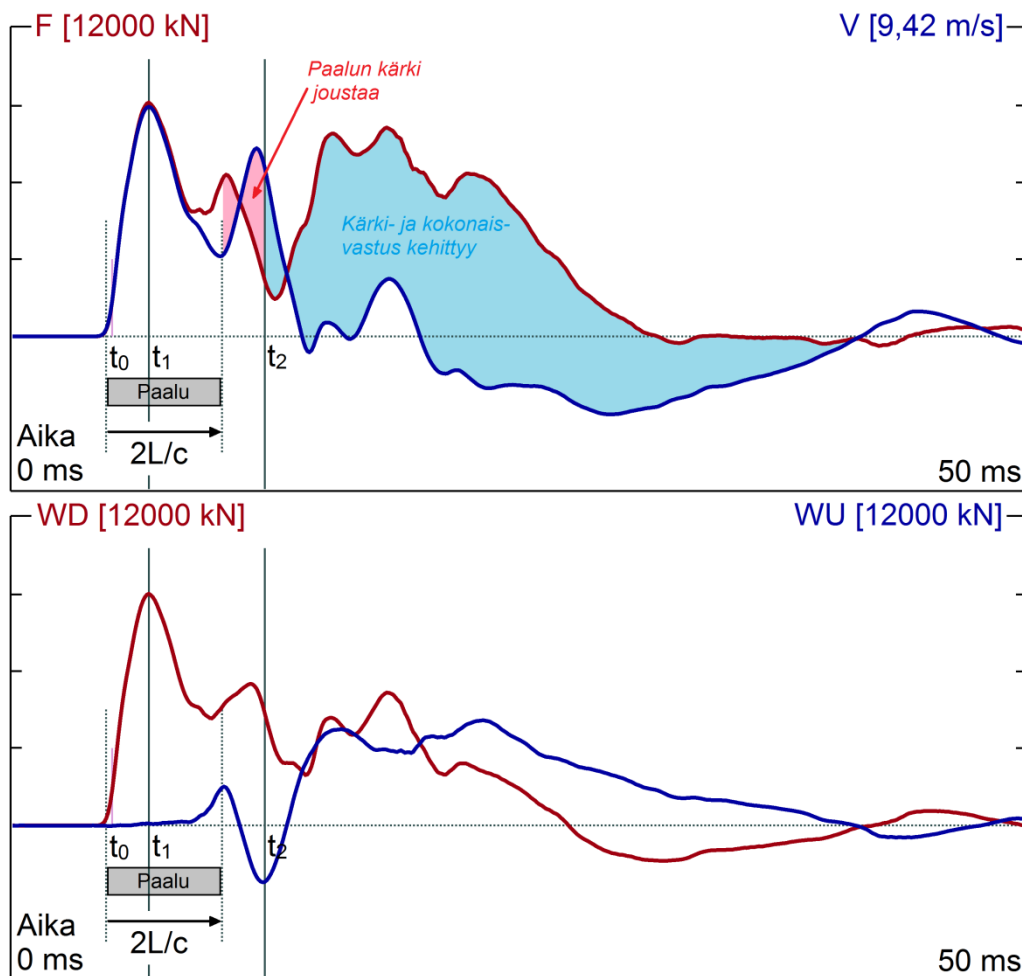
Paalun kärjen jousto voimistuu usein paalun asennuksen edetessä, kun paalutuksesta aiheutuva huokosveden ylipaine paalun kärjen alla entisestään kasvaa. Kun huokosvedenpaine paalun lyönnin lopettamisen jälkeen hiljalleen laskee ja palautuu ennalleen, myös jousto paalun kärjen alla pienenee. Huokosveden ylipaineen tasoittuminen kestää tyypillisesti muutamasta tunnista noin muutama vuorokautteen sellaisissa kantavissa kerroksissa, joihin tukipaalujen kärjet usein tukeutuvat.

Paalujen dynaaminen koekuormitus ja ehjyysmittaus

Voimakas jousto eli suuri paalun ja maan tilapäinen kokoonpuristuminen vaativat paljon energiaa. Käytännössä tällöin suurin osa iskulaitteen lyöntienergiasta kuluu jouston ja lyönnistä jäljelle jäänyt energia ei riitä aikaansaamaan paalun pysyvää painumaa ja paalu vain ”pomppii” paikallaan. Kun huokosveden ylipaine ajan kuluessa purkautuu, alkaa paalu lyötäessä painua uudelleen. Tällöin varsinaisen upotuksen loppuvaiheessa määritetyt paalun lopetuslyönnit eivät anna oikeaa kuvaa paalun geoteknisestä kestävydestä tällaisessa maakerroksessa.

Koekuormituksen kannalta suuri jousto tarkoittaa, että riittävän pysyvän painuman aikaansaaminen vaaditaan poikkeuksellisen suuri lyöntienergia. Mikäli paalu painuu suurella lyöntienergialla vain vähän, mutta paalulta mobilisoitunut vastus on silti suhteellisen alhainen, on jousto paalun kärjessä oletettavasti voimakasta.

Kuvassa 19 on esitetty koekuormitusisku suuriläpimittaisesta teräspalkkipaalusta, missä paalun kärki antaa ensin periksi ja painuu (joustaa) ennen kärkivastuksen kehittymistä. Paalun kärjessä (ajan hetkellä $2L/c$) nopeus ensin kasvaa voimakkaasti ja voima laskee eli paalun kärki siirtyy alaspäin. Tästä hetken päästä ($\sim 2-3$ ms) nopeus kuitenkin painuu nollaan ja voima kasvaa jyrkästi, viitaten suureen, mutta viivästyneeseen kärkivastukseen. Vastaavasti ylöspäin kulkeva voima painuu kärjen kohdalla ensin reilusti alaspäin ennen kuin kärkivastus alkaa kehittyä ja ylöspäin kulkeva voima kuvaajassa kasvamaan.

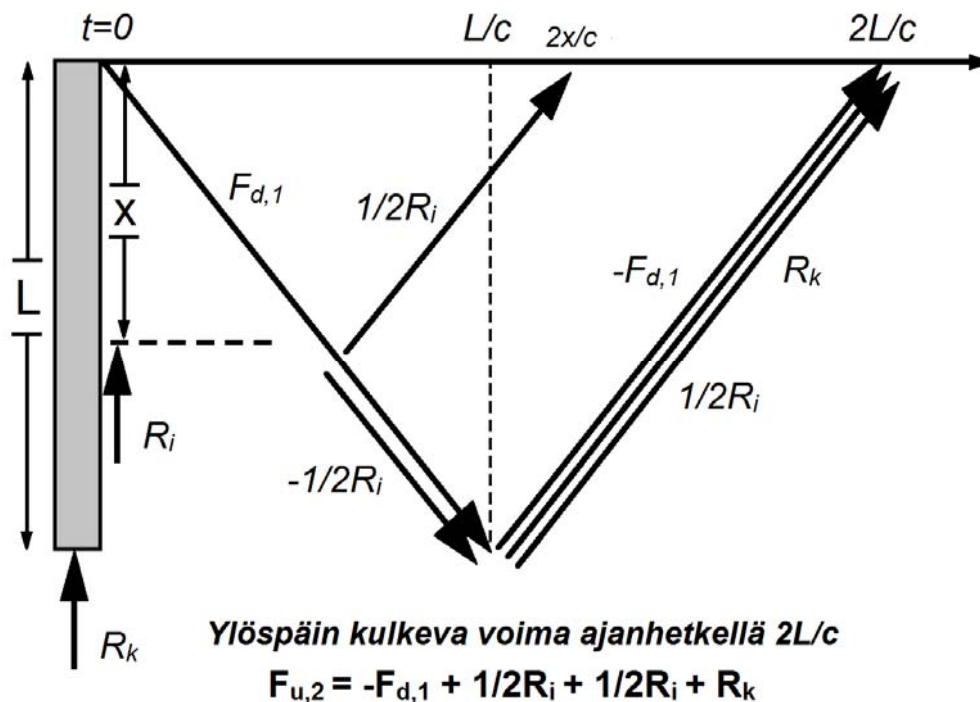


Kuva 19. Paalun kärjen jousto näkyy vetoaaltona ennen kärjeltä tulevan vastuksen kehittymistä.

Paalun kärjen mahdollisen jouston vähentämiseksi tukipaalutkin tulisi pyrkiä mittaamaan aina aikaisintaan jotain tunteja upotuksen päätyttyä. Jouston vähentämiseksi suuret teräsputkipaalut voidaan lisäksi täyttää puhtaalla vedellä koekuormituksen ajaksi, jolloin vaadittu lyöntienergian tarve riittävän pysyvän painuman aikaansaamiseksi on vähäisempi.

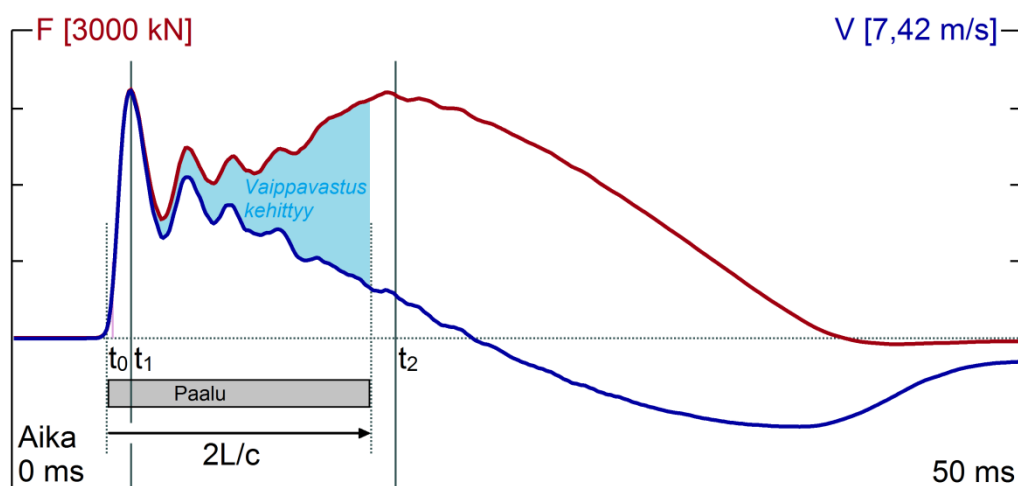
2.4.6 Paalun vaipalta tuleva vastus

Paalun vaipalta tuleva vastus kehittyy aikavälillä $t_0 \dots t_0 + 2L/c$. Kuvassa 20 on esitetty iskuaallon heijastuminen paalun vaipalta. Vaipalta tuleva vastus R_i , syvyydellä x , aiheuttaa heijastuvan puristusaallon $1/2R_i$, joka havaitaan paalun yläpäässä ajan hetkellä $2x/c$.

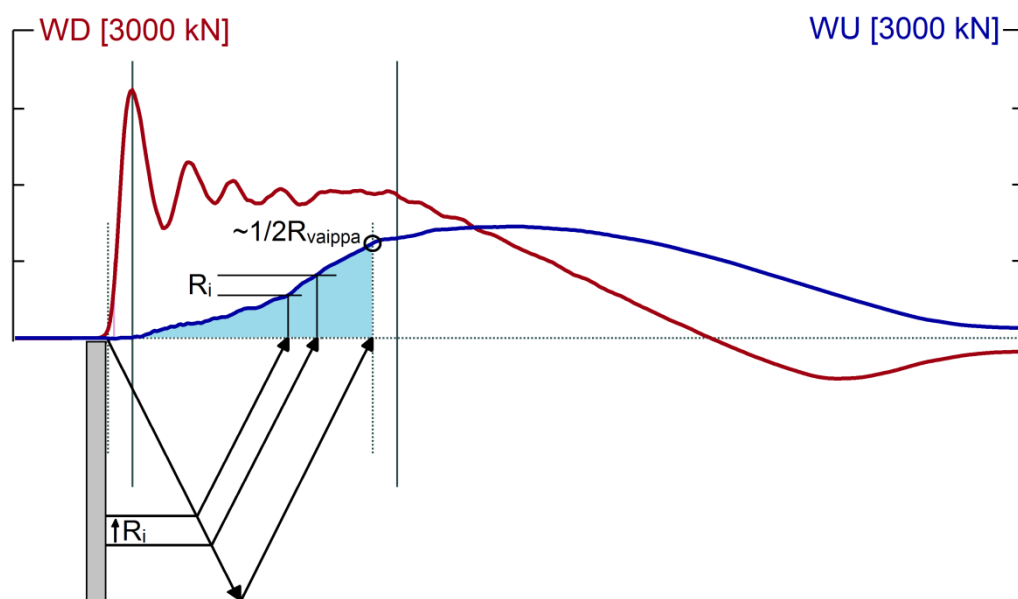


Kuva 20. Paalun vaipalta tuleva vastus näkyy puristusaaltona aikavälillä $t_0 - t_0 + 2L/c$. Perustuu lähteeseen (Pile Dynamics, Inc., 2015).

Paalun vaipalta tuleva vastus näkyy kuvan 21 voima-nopeus -kuvaajassa sinisen voimaviivan ja punaisen nopeusviivan erkanemisena toisistaan iskuaallon ensimmäisen huipun jälkeen. Vastaavasti kuvassa 22 ylöspäin kulkevan voiman (WU, sininen viiva) kohoaa ylöspäin. Mitä suurempi vastus paalun vaipalla on, sitä jyrkemmin (WU) viiva nousee. Paalun vaippakestävyydestä saadaan karkea arvio kertomalla ylöspäin kulkevan voiman arvo ajanhetkellä $t_0 + 2L/c$ kahdella ($2x$).



Kuva 21. Paalun vaippavastus näkyy voiman ja nopeuden funktioiden erkanemisena aikavälillä $t_0 - t_0 + 2L/c$.



Kuva 22. Ylöspäin kulkevan voiman funktio nousee ylöspäin sitä jyrkemmin, mitä enemmän paalun vaipalla on vastusta.

2.4.7 Paalun impedanssin muutokset

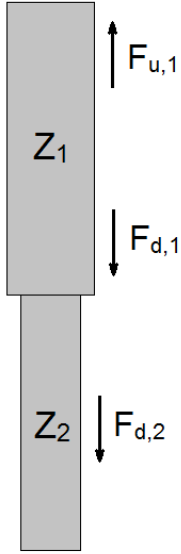
Vaurio paalussa näkyy heijastuvana vetoaaltona ennen ajan hetkeä $2L/c$. Vaurion sijainti paalussa voidaan määrittää vetoaallon saapumisajan mukaan, etäisyytenä mitausantureista kaavan 2.27 mukaan.

$$x_{\text{vaurio}} = \frac{c \cdot t_{\text{vaurio}}}{2} \quad (2.27)$$

c = aallonnopeus paalussa

t_{vaurio} = vetoaallon saapumisaika

Paalun vauriokohdassa paalun impedanssi pienenee kuvan 23 tapaan ($Z_1 > Z_2$).



Kuva 23. Paalun vauriokohdassa paalun impedanssi pienenee.

Voimien ja nopeuksien tasapainoyhtälöt impedanssin muutoskohdassa ovat:

$$F_{u,1} + F_{d,1} = F_{d,2} \quad (2.28)$$

$$v_{u,1} + v_{d,1} = v_{d,2} \quad (2.29)$$

Lisäämällä kahden poikkileikkauksen impedanssit nopeuden lausekkeeseen saadaan:

$$\left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)(Z_1 \cdot v_{u,1} + Z_1 \cdot v_{d,1}) = Z_2 \cdot v_{d,2} \quad (2.30)$$

Kun

$$F_{u,1} = -v_{u,1} \cdot Z_1 ; F_{d,1} = v_{d,1} \cdot Z_1 ; F_{d,2} = v_{d,2} \cdot Z_2 \quad (2.31)$$

Ja merkitsemällä $\beta = Z_2/Z_1$ saadaan edelleen:

$$\beta(-F_{u,1} + F_{d,1}) = F_{d,2} \quad (2.32)$$

Tai sijoittamalla tähän yhtälö (2.28):

$$\beta(-F_{u,1} + F_{d,1}) = F_{u,1} + F_{d,1} \quad (2.33)$$

Ratkaisemalla β saadaan:

$$\beta = \frac{F_{u,1} + F_{d,1}}{-F_{u,1} + F_{d,1}} \quad (2.34)$$

Mitä suurempi vaurio paalussa on, sitä pienemmäksi tulee suhde $\beta = Z_2/Z_1$. Paalun vai-
palta tulevan vastuksen R_x vaikutusta β -lukuun voidaan huomioida seuraavasti:

$$\beta = \frac{F_{u,1} + F_{d,1} - 1,5R_x}{-F_{u,1} + F_{d,1} - 0,5R_x} \quad (2.35)$$

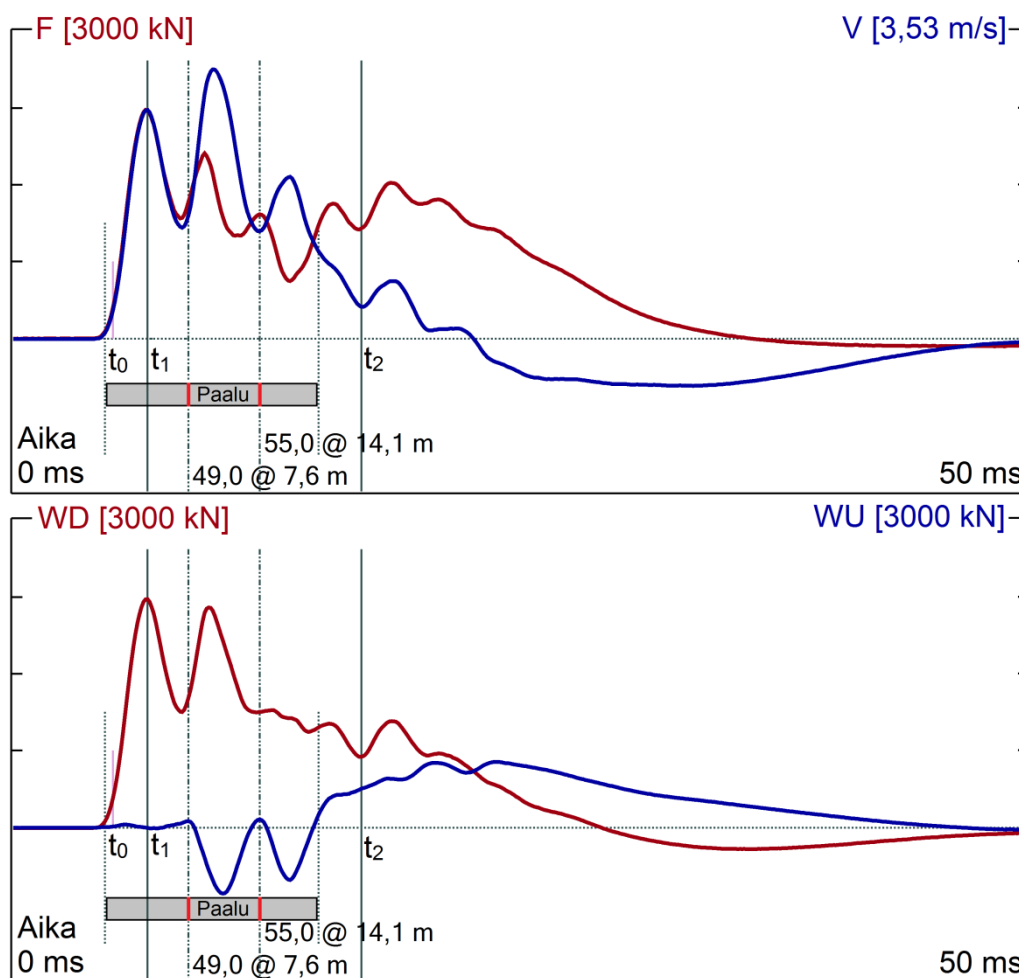
Paalujen dynaaminen koekuormitus ja ehjyysmittaus

Paalun vaurion suuruutta voidaan arvioida β -luvun perusteella suurpiirteisesti taulukon 3 mukaan.

Taulukko 3. Paalun vaurion suuruuden arviointi β -luvun perusteella.

β -luku [%]	Paalun kunto
100	Ehjä paalu
80-100	Lievästi vaurioitunut paalu
60-80	Vaurioitunut paalu
< 60	Pahoin vaurioitunut paalu

Ehjän paalun ylöspäin kulkevan voiman funktio pysyy melko tasaisena aikavälillä $t_0 - t_0 + 2L/c$ kuvien 14 ja 16 tapaan tai nousee asteittain vaippavastuksen seurauksena kohdassa 2.4.6 esitetyn tavoin. Kuvassa 24 on esitetty kahdesta kohdasta vaurioituneen 19,5 m pitkän TB300 teräsbetonipaalun iskuaaltokuvaajat. Paalun vauriokohdasta heijastuva vetoaalto näkyy samanaikaisena jyrkkänä nopeuden kasvamisena ja voiman pienentymisenä. Vastaavasti ylöspäin kulkevan voiman funktio pienenee jyrkästi. Kuvan 24 iskuaaltokuvaajissa vaurioiden sijaintia on havainnollistettu (mittausohjelmiston toimesta) pystysuorilla vaurioviivoilla, joiden yhteydessä näkyy lisäksi vaurioiden etäisyydet mittausantureista, 7,6 m ja 14,1 m sekä vaurioita vastaavat β -luvut, 49 ja 55.



Kuva 24. Kahdesta kohtaa (punaiset viivat) vaurioitunut 19,5 m pitkä TB300 teräsbetonipaalu.

Kuvan 24 tapauksessa paalu ei ole täysin poikki vaan paalun kärki ja kärjestä kehittyvä vastus on havaittavissa iskuaaltokuvaajista. Koekuormituslyönnillä paalusta mobiilisoituu koekuormitushetkellä noin 1,9 MN staattinen vastus, joka olisi paalukuormaan nähden riittävä. Vaurioiden vakavuudesta johtuen paalu tulee kuitenkin korvata uudella paalulla.

Loivat laskevat muutokset ylöspäin kulkevan voiman kuvaajassa johtuvat usein maaperän vastuksesta, paalun aikaisesta kuormituksesta palautumisesta, paalun käyryydestä tai signaalin heikosta laadusta.

Lievät vauriot paalussa eivät yleensä ole ongelma paalun toiminnalle ja pienet halkeamat betonissa voivat jopa ajan myötä korjautua itsekseen kosteassa maaperässä, mutta pahemmin vaurioituneiden paalujen ($\beta < 80\%$) soveltuvuutta käyttöön tulee sen sijaan aina arvioida. Kitkapaaluilla vaurio ei ole välttämättä ongelma, mikäli vaurio sijaitsee riittävän syvällä ja vaurion yläpuoleiselta vaipan osuudelta tulee riittävä geotekninen kestävyys. Tukipaalulla kärkikestävyys vaurion alapuolella on käyttötilan kannalta usein epäluotettava, koska vaurion ylä- ja alapuolisen paalun osan välille syntyy mahdollisesti kulman muutos, joka heikentää paalun rakenteellista kestävyyttä. Tämän lisäksi teräsbetonipaalujen raudoitustangot voivat paljastua vaurion kohdalta ja altistaa korroosiolle.

3 Signaalinmallinnus

3.1 Signaalinmallinnuksen periaatteet

Ohje

Lähtötietoina signaalinmallinnuksessa tarvitaan: hyvälaatuinen mittaus-signaali, paalun pysyvä painuma koekuormitusiskulla, paalun pituus antureiden alapuolella, paalun tunkeuma ja mahdolliset poikkeamat paalun poikkeileikkauksessa.

Signaalinmallinnuksessa suositellaan vertailemaan wave up kuvaajia keskenään.

Signaalinmallinnusanalyysin avulla selvitettyä vaimennuskerrointa voidaan käyttää kohteen muille samanlaisille paaluille, mikäli paalut käyttäytyvät asennuksessa samalla tavalla ja pohjaolosuhteet eivät merkittävästi muutu paalujen välillä.

Mikäli paaluille tehdään signaalinmallinnus, voidaan se huomioida varmuustasoa määritettäessä (RIL 254-2011).

Signaalinmallinnuksessa iskuaaltotapahtumasta luodun matemaattisen mallin avulla laskettua iskuaaltokuvaajaa verrataan dynaamisessa koekuormituksessa mitattuun iskuaaltokuvaajaan.

Matemaattinen maamalli koostuu elastoplastisista jousista ja lineaarisista vaimentimista. Paalun yläpään annetaan lähtötiedoksi esimerkiksi mitattu nopeus, jonka perusteella ohjelmisto laskee maamallista aiheutuneet paaluun kohdistuvat voimat. Matemaattista mallia iteroidaan niin kauan kunnes laskettu signaali vasta riittävän hyvin mitattua signaalia. Ohjelmalla voidaan iteroida parametreja automaattisesti, mutta myös käyttäjä voi tehdä muutoksia käsin. Lopuksi ohjelman käyttäjä tarkistaa ohjelman antamat parametrit ja arvioi, ovatko ne realistisia. Lisäksi ohjelma varoittaa, mikäli jokin parametri on sallittujen/realististen rajojen ulkopuolella.

Signaalinmallinnusanalyysissä tavoitellaan parasta mahdollista vastaavuutta realistisilla parametreilla mitatun ja lasketun voima-, nopeus- tai wave up kuvaajien kesken. Analyysissä suositellaan vertailemaan kuitenkin wave up kuvaajia keskenään. Signaalinmallinnuksen kulusta on esitetty havainnollistava kaavio liitteessä 3.

Muiden ohjelmistojen tulosteissa on esitetty vastaavat asiat kuin CAPWAP-ohjelmiston tulosteissakin. Tulosteiden ulkomuoto ja tuloksien esitysjärjestys voivat poiketa kuitenkin ohjelmistojen kesken. Signaalinmallinnuksen tekijä voi itse määrittää mitä asioita tulosteessa esitetään. Jäljempänä on esitelty, mitä tulosteissa tulisi esittää ja mitkä asiat on tuloksien tulkitsijan näkökulmasta tärkeää huomioida.

Signaalinmallinnuksessa ensiarvoisen tärkeää on hyvälaatuinen mittaussignaali. Hyvän mittaussignaalin edellytyksenä on, että anturit ovat ehjiä, anturien kiinnitetty tiukasti ja yhdensuuntaisesti paalun pystyakselin kanssa. Lisäksi voima ja nopeus ovat yhtenevät iskun alussa ($0,9 \leq f_{vp} \leq 1,1$). Lähtötietoina signaalinmallinnuksessa tarvitaan

hyvälaatuisen mittaussignaalin lisäksi paalun pysyvä painuma rekisteröidyllä koekuormitusiskulla, paalun pituus antureiden alapuolella, paalun tunkeuma ja mahdolliset poikkeamat paalun poikkileikkauksessa.

Signaalinmallinnuksessa tarvitaan aina alkuperäinen mittaustiedosto, jonka tulee olla yhteensopiva käytettävän signaalinmallinnusohjelmiston kanssa. Esimerkiksi signaalinmallinnus CAPWAP-ohjelmistolla voidaan tehdä PDA-mittaustiedostolle, mutta eri valmistajien laitteet ja ohjelmistot eivät välttämättä toimi ristiin.

Signaalinmallinnuksella saadaan selville paalun kärki- ja vaippavastuksen jakautuminen mittaushetkellä sekä paalun kuorma-siirtymäkuvaaja ja CASE-vaimennuskerroin, J_c , kulloisissakin pohjaolosuhteissa. Signaalinmallinnuksen perusteella määritetty estimaatti paalun geoteknisestä kestävydestä on luotettavampi, joka puoltaa alhaisemman varmuustason käyttöä ja dynaamiselle koekuormitukselle ominaiset korrelaatio-kertoimet voidaan kertoa mallikertoimella 0,9. (RIL-254 2011; Liikenneviraston ohjeita 35, 2013; SFS-EN 1997-1).

Signaalinmallinnusanalyysin avulla selvitettyä vaimennuskerrointa voidaan käyttää kohteen muille paaluille, mikäli paalut käyttäytyvät asennuksessa samalla tavalla ja pohjaolosuhteet eivät merkittävästi muutu paalujen välillä.

Kappaleessa 3.2 on esitetty, mitä signaalinmallinnusanalyysin tuloste pitää sisällään ja mihin tulosten käsittelijän tulisi erityisesti kiinnittää huomiota. Lisäksi kappaleessa on esitelty tulosten hyödyntämistä ja tulkintaa.

3.2 Tulosten tulkinta

Ohje

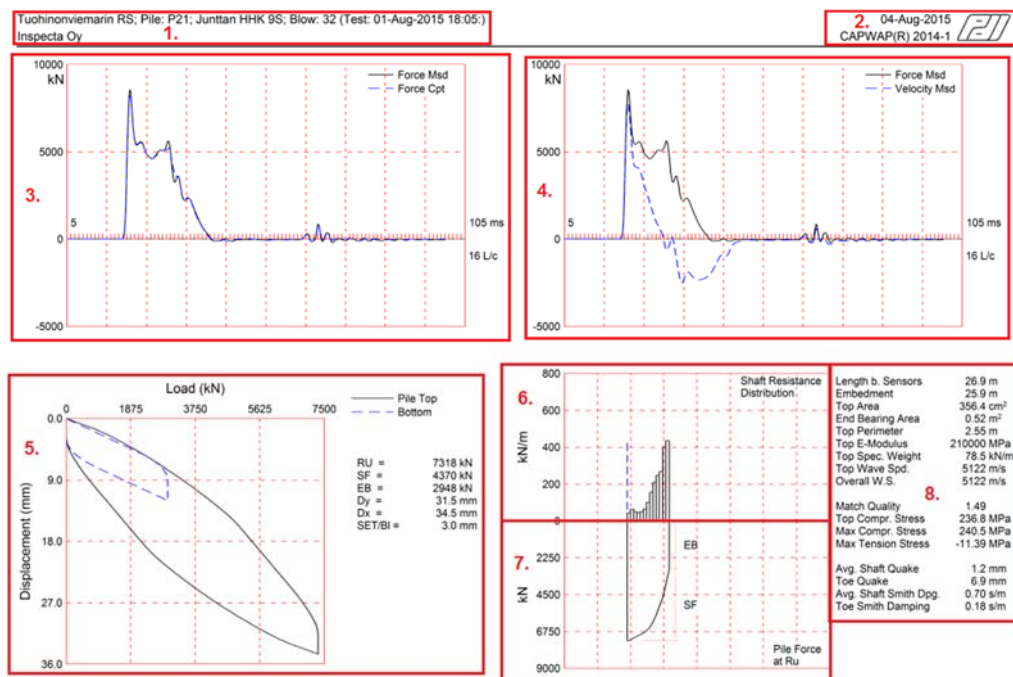
Signaalinmallinnuksessa suosituksista poikkeavia parametreja tulee käyttää ainoastaan harkiten ja niiden käyttö on aina perusteltava.

Puristuksessa määritetystä vaippakestävydestä voidaan hyödyntää maksimissaan 80 % vetokestävyttä määritettäessä, mikäli ei ole tehty erikseen vetokoekuormitusta.

Hienorakeisissa maakerroksissa saavutettua vaippavastusta ei saa hyödyntää pitkäaikaisessa kuormituksessa. Signaalinmallinnuksen avulla määritetystä vaippakestävydestä tulee vähentää hienorakeisten maakerrosten osuus koko vaippakestävydestä.

Signaalinmallinnuksen tuloksena esitetään aina ratkaisu, jolla saadaan paras vastaavuus mitatun ja mallinnetun signaalin välillä realistisilla parametreilla.

Kuvassa 25 on esitetty CAPWAP-tulosteen etusivu. Etusivulta nähdään kaikki perustiedot koekuormituksesta, paalun kärki- ja vaippavastusjakauma, kuorma-siirtymäkuvaaja, paalun tiedot, mitattu voima-nopeus kuvaaja sekä mitattu ja mallinnettu voimakuvaaja.



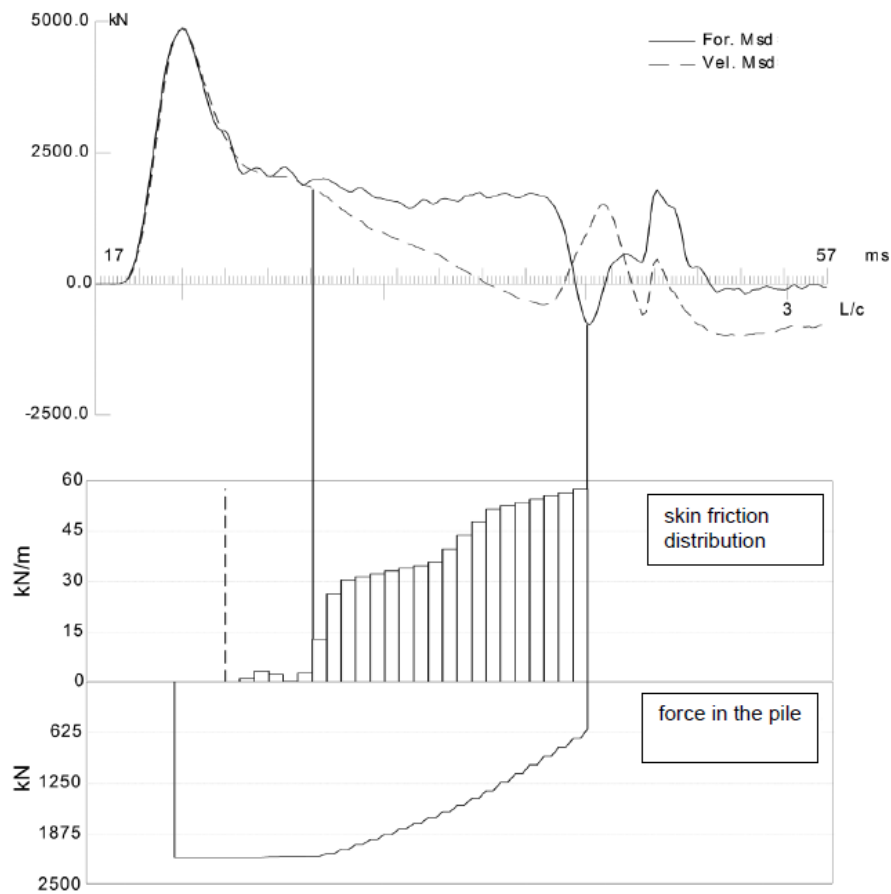
Kuva 25. CAPWAP-tulosten etusivunäkymä.

Kuvassa 25 numeroidut kohdat 1–8 on selitetty taulukossa 4. Etusivunäkymästä voidaan yhdellä kertaa nähdä kattavasti kaikki perustiedot signaalinmallinnusanalyysistä.

Taulukko 4. CAPWAP-tulosten etusivunäkymän sisältö

1.	Koekuormituksen tiedot: Kohde, paalun numero, koekuormitusjärkäle, lyöntinumero, koekuormituksen suoritus aika, yritys
2.	Analyysin tiedot: Analyysin päivämäärä, ohjelmistoversio
3.	Voima-aikakuvaaja: Mitattu (Msd) ja laskettu (Cpt) voima-aikakuvaaja
4.	Voima-nopeuskuvaaja: Dynaamisessa koekuormituksessa mitattu voima-nopeuskuvaaja
5.	Kuorma-siirtymäkuvaaja: Paalun ylä- ja alapään siirtymät kuorman funktiona, kokonaisvastus analyysin perusteella (RU), vaippavastus (SF), kärkivastus (EB), paalun elastinen kokoonpuristuma (Dy), paalun kokonais-painuma (Dx), paalun pysyvä painuma/lyönti (SET/BI)
6.	Vaippavastusjakauma: Paalun vaippavastus paalusegmenteittäin
7.	Paaluun vaikuttava voima: Paalun vaikuttava voima (RU) paalu-segmenteittäin
8.	Paalun ominaisuudet ja analyysin parametreja: Paalun pituus antureiden alapuolella, upotettu paalupituus, paalun pinta-alatietoja, paalumateriaalin tiheys, maksimi aallonnopeus, kokonaisvaltainen aallonnopeus, Match Quality (MQ) ”analyysin tarkkuus”, paalussa vaikuttavat jännitykset, vaipan ja kärjen quake-arvot, Smithin vaimennuskertoimet

Kuvassa 26 on havainnollistettu taulukon 4 kohta 6., kuinka paalun vaippavastus määrittyy voima-nopeus kuvaajan perusteella.



Kuva 26. Vaippavastusjakauma CAPWAP-analyysin perusteella (prEN ISO-22477-4).

Etusivun lisäksi CAPWAP-tulosteissa on normaalisti 2-3 sivua analyysin tuloksia taulukoituna. Taulukoista saadaan tarkat arvot esimerkiksi paalun vaippavastukselle jokaisessa paalusegmentissä, maamallissa käytetyt parametrit, paaluvastuksen herkkyys vaimennuskertoimen valinnalle sekä paalusegmenteissä esiintyvät jännitykset, partikkelinopeudet ja siirtymät. Tulosteen jokaisen sivun yläreunassa on esitetty koekuormituksen ja analyysin tiedot kuten kuvassa 25 kohdissa 1. ja 2. Taulukoissa 5–9 on esitetty CAPWAP-tulosteissa normaalisti esitettäviä tietoja.

Taulukossa 5. CAPWAP-tulosteen yhteenvetotaulukko.

CAPWAP SUMMARY RESULTS							
Total CAPWAP Capacity: 7318.3; along Shaft 4370.2; at Toe 2948.1 kN							
Soil Sgmnt No.	Dist. Below Gages	Depth Below Grade	Ru	Force in Pile	Sum of Ru	Unit Resist. (Depth)	Unit Resist. (Area)
1.	2. m	3. m	4. kN	5. kN	6. kN	7. kN/m	8. kPa
				7318.3			
1	2.1	1.1	47.0	7271.3	47.0	43.96	17.21
2	4.1	3.1	132.8	7138.5	179.8	64.18	25.13
3	6.2	5.2	104.5	7034.0	284.3	50.50	19.77
4	8.3	7.3	94.0	6940.0	378.3	45.43	17.79
5	10.3	9.3	104.0	6836.0	482.3	50.26	19.68
6	12.4	11.4	135.5	6700.5	617.8	65.48	25.64
7	14.5	13.5	210.0	6490.5	827.8	101.49	39.73
8	16.6	15.6	323.1	6167.4	1150.9	156.14	61.13
9	18.6	17.6	432.9	5734.5	1583.8	209.21	81.91
10	20.7	19.7	510.2	5224.3	2094.0	246.57	96.54
11	22.8	21.8	553.0	4671.3	2647.0	267.25	104.63
12	24.8	23.8	824.1	3847.2	3471.1	398.26	155.93
13	26.9	25.9	899.1	2948.1	4370.2	434.51	170.12
Avg. Shaft			336.2			168.73	66.06
Toe			2948.1				5678.99

Taulukossa 5 on esitetty tulosteen yhteenvetotaulukko, jossa 1. sarakkeessa näkyy maasegmentit, joita on tässä tapauksessa yhteensä 13. Signaalinmallinnuksessa paalu jaetaan noin 1 m mittaisiin paalusegmentteihin. Paalusegmentit ovat yleensä varsin lyhyitä, joten paalun vaipalla kahta paalusegmenttiä kohti on aina yksi maasegmentti ja kärkivastusta kuvaa yksi maasegmentti. 2. ja 3. sarakkeessa on esitetty etäisyys segmentin pohjasta antureihin (Dist. Below Gages) ja etäisyys maanpinnasta segmentin pohjaan (Depth Below Grade). Sarakkeissa 4. ja 5. on esitetty segmentissä vaikuttava vastus (Ru) ja voima (Force in Pile). Sarakkeessa 6. esitetään vastuksen arvo ylhäältä alaspäin mentäessä. Sarakkeissa 7. ja 8. on annettu arvot paalun vaippavastukselle syvyyden ja paalun vaippapinta-alan mukaan.

Taulukko 6. CAPWAP-tulosteen taulukko maamallissa käytetyistä parametreista.

Soil Model Parameters/Extensions		Shaft	Toe
Smith Damping Factor		0.70	0.18
Quake	(mm)	1.2	6.9
Case Damping Factor		2.09	0.36
Damping Type		Viscous	Sm+Visc
Unloading Quake	(% of loading quake)	30	116
Reloading Level	(% of Ru)	100	100
Unloading Level	(% of Ru)	36	
Resistance Gap (included in Toe Quake)	(mm)		2.2
Soil Plug Weight	(kN)	3.082	3.736
Soil Support Dashpot		1.973	0.000
Soil Support Weight	(kN)	26.43	0.00

Quake-arvo on siirtymä, jolla paalun geotekninen murtokestävyys mobilisoituu. Tämä siirtymän jälkeen muodonmuutokset muuttuvat elastisista plastisiksi. Vaipan quake saa normaalisti arvon 2,5–5 mm, maksimissaan noin 8 mm. Kärjen quake-arvo on maksimissaan noin 25 mm. Quake ei voi myöskään saada arvoa 0. (Pile Dynamics, Inc, 2014). Taulukossa 6 vaipan quake on 1,2 mm ja kärjessä 6,9 mm.

Yleensä quake-arvon yläraja on paalun pysyvä painuma koekuormituksessa. Vaipan quake-arvo on yleensä sama jokaisella paalusegmentillä, mutta arvoja voidaan myös muuttaa paalupituudella. Tapauksissa, joissa siirtymät paalun kärjen lähellä ovat vähäisiä, voidaan käyttää paalun vaipan alaosassa pienempiä quake-arvoja kuin paalun yläosassa, jossa siirtymät ovat suurempia.

CAPWAP-analyysissä vaimennuskerroin voidaan antaa joko CASE-vaimennuskertoimen, J_c , (mallinnuksessa erikseen vaipalle JS ja kärjelle JT) tai Smith-vaimennuskertoimen (vaipalle SS ja kärjelle ST) avulla. Suositellut arvot Smithin vaimennuskertoimelle (Smith Damping Factor) ovat 0,08-1,31 sekä vaipalla että kärjessä (Pile Dynamics, Inc, 2014). Taulukossa 6 Smithin vaimennuskertoimet ovat vaipalla 0,7 ja kärjessä 0,18. Smith-viscous lähestymistavalla dynaaminen vastus lasketaan kaavalla

$$R_{dk} = J_{sk} \cdot v_i \cdot R_{uk} \quad (2.36)$$

J_{sk} = Smith-vaimennuskerroin

v_i = segmentin nopeus

R_{uk} = maksimi staattinen vastus

CASE-vaimennuskerroin saadaan kaavalla 2.37, eli jakamalla puhtaasti viskoosinen vaimennuskerroin paalusegmentin impedanssilla, jolloin jäljelle jää yksikötön kerroin, J_c . Taulukossa 6, CASE-vaimennuskerroin on vaipalla 2,09 ja kärjessä 0,36.

$$J_c = \frac{J_{sk} \cdot R_{uk}}{Z_i} \quad (2.37)$$

Mikäli paalun staattinen vastus muuttuu, niin samalla myös CASE-vaimennuskerroin, J_c , muuttuu (kaava 2.21), mutta Smithin vaimennuskerroin pysyy vakiona, koska se on riippuvainen vain staattisen vastuksen maksimiarvosta. Tästä syystä on helpompaa antaa ohjearvoja Smith-viscous vaimennuskertoimelle toisin kuin CASE-vaimennuskertoimelle. (Pile Dynamics, Inc, 2014).

Damping type on taulukossa 6 paalun vaipalla Viscous ja kärjessä Smith+Viscous. Vaimennusta voidaan paalun vaipalla ja kärjessä laskea CAPWAP-analyysissä kolmella tavalla: oletuksena yleisin vaihtoehto Smith-viscous-menetelmä (Viscous), perinteinen Smith-menetelmä (Smith) ja kolmantena näiden yhdistelmä, jossa käytetään perinteistä Smith-vaimennusta, kunnes paalun staattinen vastus saavutetaan, jonka jälkeen käytetään Smith-viscous-vaimennusta (Smith+Viscous). Vaihtoehtoista valitaan kuitenkin aina se, jolla saadaan paras Match Quality -arvo.

Unloading quake on usein eri kuin loading quake, koska maasta aiheutuva vastus on erilainen vedossa (negatiivinen nopeus). Unloading quake saadaan kertomalla loading quake vaipan ja kärjen kertoimilla c_u . Oletuksena kertoimet ovat 1, jolloin unloading quake on sama kuin loading quake. Kerroin c_u ei voi ikinä saada arvoa 0, harvoin arvoa joka on $< 0,3$. Ehdoton alaraja kertoimelle on 0,1. Kärjen tai vaipan kerroin voi saada myös arvon > 1 . Kärjen kerroin voi olla > 1 esimerkiksi silloin, kun toe gap on > 0 , jolloin kärjen quake on toe gap + quake. (Pile Dynamics, Inc, 2014). Taulukossa 6 unloading quake on vaipalla 0,3 (30 %) ja kärjessä 1,16 (116 %).

Resistance Gap arvolla mallinnetaan paalun kärjen ja kantavan kerroksen väliin jäävää rakoa, joka syntyy, kun paalu ponnahtaa kantavan kerroksen pinnasta hieman ylöspäin paalua lyötäessä. Seuraavalla lyönnillä paalun tulee siis siirtyä tuon raon verran alas päin ennen kuin kärki saa kontaktin kantavaan kerrokseen ja karkivastus aktivoituu.

Paalujen dynaaminen koekuormitus ja ehjyysmittaus

Tällainen tilanne voi tulla vastaan kärjellä kantavilla paaluilla, joilla on matala vaippavastus, jolloin paalun on mahdollista ponnahtaa ylöspäin. Jotta paalun geotekninen murtokestävyys mobilisoituu täysin, on paalun kärjen pysyvän painuman oltava suurempi kuin Resistance Gap + Toe Quake. Taulukossa 6 Resistance Gap on lisätty jo valmiiksi kärjen Quake -arvoon.

Reloading level määrittää vastuksen saman lyönnin toisella tai myöhemmillä kuormituskierroksilla (heijastuksilla), kun paalun kärjestä ylöspäin heijastuva voima (unloading) vaihtaa paalun yläpäässä suuntaa uudestaan taas alaspäin kulkeväksi (loading). Reloading level on normaalisti 1 (eli 100 %). Reloading level ei juuri vaikuta paalun geoteknisen kestävyysarviointiin, mutta reloading level saattaa vaikuttaa Match Quality -arvoon, kun sen avulla pystytään mahdollisesti parantamaan iskuaaltotapahtuman loppuosan mallinnusta.

Soil Plug Weight eli paalun tulpan paino mallintaa paalun vaippaan tai kärkeen tarttunut maamassaa. Tulpan painon avulla voi mallintaa avoimen teräsputkipaalun kärjen lisäksi myös suljetun teräsputkipaalun kärjen alle jäänyttä maamassaa, joka ei pääse poistumaan sivuille. Tulpan paino on rajoitettu signaalinmallinnusohjelmassa, siten että se ei ole suurempi kuin kolme kertaa sen paalusegmentin paino, johon tulppa on kohdistunut (Pile Dynamics, Inc, 2014).

Avoimilla teräsputkipaaluilla tulpan paino on tärkeässä roolissa, kun mallinnetaan putken kärjen tulppautumista ja putken sisäistä vaippavastusta. Avoimilla putkilla kärjen tulppa viivästyttää vetoaallon syntyä paalun kärjestä, jolloin paalu vaikuttaa pidemmältä kuin oikeasti on. Tämä johtuu siitä, että aallon nopeuden yhtälössä tiheys ρ kasvaa tulpan massan vuoksi.

Soil Support Dashpot ja Soil Support Weight avulla mallinnetaan säteittäistä vaimennusta (radiation damping). Säteittäisen vaimennuksen avulla voidaan mallintaa tilanteita, joissa maan vastus riippuu enemmän nopeudesta kuin siirtymistä. Tällaisia tilanteita voi tulla vastaan esimerkiksi silloin, kun paalun kärki tukeutuu kallioon.

Taulukko 7. CAPWAP-tulosten taulukko analyysin tiedoista.

CAPWAP match quality	=	1.49	(Wave Up Match) ; RSA = 0
Observed: Final Set	=	3.0 mm;	Blow Count = 333 b/m
Computed: Final Set	=	2.8 mm;	Blow Count = 361 b/m
Transducer	F1(J248)	CAL: 90.1; RF: 1.00; F2(6271)	CAL: 100.4; RF: 1.00
	F3(J372)	CAL: 90.6; RF: 1.00; F4(6272)	CAL: 105.0; RF: 1.00
	A1(45904)	CAL: 1150; RF: 1.00; A2(45902)	CAL: 1160; RF: 1.00
Not Active	A3(P2237)	CAL: 330; RF: 1.00; A4*(P2234)	CAL: 335; RF: 1.00
max. Top Comp. Stress	=	236.8 MPa	(T= 21.2 ms, max= 1.016 x Top)
max. Comp. Stress	=	240.5 MPa	(Z= 4.1 m, T= 21.8 ms)
max. Tens. Stress	=	-11.39 MPa	(Z= 12.4 m, T= 44.6 ms)
max. Energy (EMX)	=	128.9 kJ;	max. Measured Top Displ. (DMX)= 22.1 mm

CAPWAP Match Quality -arvo kertoo siitä, kuinka hyvin iskuaaltotapahtuman mallinnus on onnistunut. Suurempi arvo kertoo heikommasta vastaavuudesta mitatun ja lasketun signaalin välillä. Joidenkin paalujen tapauksessa matalan Match Quality -arvon saavuttaminen voi olla haastavaa. Esimerkiksi paaluille, joilla on korkea kärkekestävyys, ei saada yhtä matalaa Match Quality -arvoa kuin paaluille, joilla on korkea vaippakestävyys. Tämä johtuu siitä, että kärkekestävyys ei noudattele elasto-plastista mal-

lia yhtä hyvin kuin vaippakestävyys. Lisäksi epähomogeenisilla paaluilla voi olla erityisen vaikea saada matalia Match Quality -arvoja. Yleisesti voidaan sanoa, että alle 4 arvot ovat hyviä. Mikäli Match Quality -arvo on yli 6, arvoja voidaan vielä käyttää, mutta harkintaa käyttäen.

Analysoitavalle iskulle annetaan lähtötietona mitattu painuma ja CAPWAP-ohjelma laskee mallin perusteella painuman. Mitatun ja lasketun painuman erotus vaikuttaa Match Quality -arvoon, jos se on valittu analyysin asetuksista.

Taulukon 7 alaosassa on esitetty maksimiarvot paalussa esiintyneistä jännityksistä. Suluissa jännityksen maksimiarvojen jälkeen on esitetty etäisyys antureista ja ajanhetki, jossa/jolloin kyseiset arvot esiintyvät. Myös lyöntilaitteesta paaluun välittynyt maksimienergia sekä paalun yläpään siirtymän maksimiarvo on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 8. CAPWAP-tulosten taulukko paalussa esiintyvistä voimista, jännityksistä sekä maksimienergiasta, -partikkelinopeuksista ja -siirtymistä.

EXTREMA TABLE								
Pile Sgmnt No.	Dist. Below Gages	max. Force	min. Force	max. Comp. Stress	max. Tens. Stress	max. Trnsfd. Energy	max. Veloc.	max. Displ.
	m	kN	kN	MPa	MPa	kJ	m/s	mm
1	1.0	8438.6	-262.3	236.8	-7.36	128.9	5.39	21.6
2	2.1	8539.8	-298.5	239.6	-8.38	126.9	5.32	20.9
4	4.1	8571.0	-383.7	240.5	-10.77	121.2	5.13	19.7
6	6.2	8172.7	-382.7	229.3	-10.74	110.5	4.98	18.4
8	8.3	7893.3	-392.0	221.5	-11.00	101.7	4.83	17.1
10	10.3	7749.9	-399.7	217.5	-11.22	93.8	4.66	15.7
11	11.4	7484.3	-354.7	210.0	-9.95	87.6	4.55	15.1
12	12.4	7657.4	-406.0	214.9	-11.39	85.8	4.43	14.4
13	13.5	7352.6	-334.7	206.3	-9.39	79.0	4.29	13.7
14	14.5	7584.1	-369.4	212.8	-10.37	77.3	4.12	13.0
15	15.5	7115.5	-230.3	199.7	-6.46	69.1	3.93	12.3
16	16.6	7387.0	-255.4	207.3	-7.17	67.7	3.73	11.7
17	17.6	6633.4	-44.2	186.1	-1.24	58.3	3.50	11.1
18	18.6	6939.0	-74.3	194.7	-2.09	57.1	3.29	10.6
19	19.7	5997.7	-0.5	168.3	-0.01	47.1	3.07	10.1
20	20.7	6271.6	-0.6	176.0	-0.02	46.1	2.85	9.5
21	21.7	5322.3	-0.4	149.4	-0.01	36.7	2.63	9.1
22	22.8	5648.8	-0.5	158.5	-0.01	36.0	2.37	8.6
23	23.8	4752.3	-0.4	133.4	-0.01	27.6	2.13	8.2
24	24.8	4867.0	-0.5	136.6	-0.02	26.9	2.08	7.8
25	25.9	3157.2	-0.7	88.6	-0.02	17.3	2.36	7.3
26	26.9	3167.5	-0.6	88.9	-0.02	7.6	2.52	6.9
Absolute	4.1			240.5			(T =	21.8 ms)
	12.4				-11.39		(T =	44.6 ms)

Extrema-tilukkuun on koottu paalussa esiintyvät jännitykset ja voimat paalusegmentteittäin. Lisäksi taulukossa on esitetty maksimienergia, joka kullekin paalusegmentille välittyy lyöntilaitteen lyönnistä. Lisäksi paalusegmenttien maksimi partikkelinopeudet ja siirtymät on esitetty extrema taulukossa. Taulukon 8 maksimiarvot on esitetty aikaisemmin samassa taulukossa 7, jossa on esitetty Match Quality -arvo sekä mitattu ja laskettu pysyvä painuma.

		CASE METHOD								
J =	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
RP	10353	9749	9144	8540	7935	7331	6727	6122	5518	4913
RX	10353	9749	9144	8540	7935	7331	6727	6122	5518	5207
RU	10590	10009	9428	8847	8266	7685	7105	6524	5943	5362
RAU =	802 (kN) ; RA2 = 6060 (kN)									
Current CAPWAP Ru = 7318 (kN) ; Corresponding J(RP) = 0.50; J(RX) = 0.50										
VMX	TVP	VT1*Z	FT1	FMX	DMX	DFN	SET	EMX	QUS	KEB
m/s	ms	kN	kN	kN	mm	mm	mm	kJ	kN	kN/mm
5.35	21.01	7815	8583	8652	22.1	2.9	3.0	130.8	10427	624

CASE-menetelmä taulukossa 9 on esitetty eri CASE-vaimennuskertoimella laskettuja paalun geoteknisen kestävyys arvoja. Tämä herkkyytarkastelu vaimennuskertoimen valinnalle on tehty sekä RSP-, RMX – että RSU-estimaateille. Taulukossa 7 on sama kuin CASE-menetelmän vaimennuskerroin J_c . Taulukossa RX on sama kuin RMX, eli paalun maksimi staattinen vastus kyseisellä vaimennuskertoimella. Menetelmä on esitetty aikaisemmin luvussa 2.1.2. RU on RSU-estimaatilla laskettu paalun staattinen vastus. RP on RSP-estimaatin (peak-to-peak) avulla laskettu paalun staattinen vastus. Peak-to-peak -estimaatissa ajanhetki t_1 on voiman huippuarvon esiintymisajankohta. Taulukossa 9 RP on sama kuin RX, joka tarkoittaa siis sitä, että peak-to-peak arvo on paalun maksimi staattinen vastus. RAU ja RA2 ovat CAPWAP-ohjelman automaattisesti laskemia paalun staattisen vastuksen arvoja erilaisissa tilanteissa. Nämä arvot ovat toissijaisia tuloksia analyysistä. Current CAPWAP Ru ilmoittaa CAPWAP-analyysistä saadun staattisen vastuksen paalulle.

Taulukossa 10 on esitetty esimerkki paalusta, jolla vaimennuskertoimen, J_c , valinnalla ei ole merkitystä paalun geotekniseen kestävyYTEEN. Esimerkin paalu on 15 metriä pitkä, 711/14,2 kalliokärjellinen teräsputkipaalu, jonka oli tarkoitus toimia kitka-paaluna. Paalun kärki on kantavassa karkearakeisessa maakerroksessa. Analyysin pe-rusteella paalun kärkivastus on 7201 kN ja vaippavastus 2679 kN vaimennuskertoimen arvolla 0,71. Kuvasta nähdään, että vaimennuskertoimen, J_c , valinnalla ei ole suurta merkitystä paalun staattiseen vastukseen, koska paalun kärjen nopeus on alhainen ja dynaaminen vastus on tällöin pieni. Paalun RMX-estimaatin arvo muuttuu välillä 10366–9843 kN vaimennuskertoimen arvoilla 0–0,9. Vaimennuskertoimen muuttami-nen arvosta 0 arvoon 0,9 laskee kyseisen paalun RMX-estimaatin arvoa siis vain noin 5 %.

Taulukko 10. Esimerkki paalusta, jolla vaimennuskertoimen valinnalla ei ole suurta merkitystä RMX-estimaatin avulla laskettuun paalun geotekniseen kestävyyteen.

	CASE METHOD									
J =	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
RP	9256	8308	7361	6413	5466	4518	3571	2624	1676	729
RX	10366	10253	10140	10030	9947	9922	9901	9882	9862	9843
RU	9256	8308	7361	6413	5466	4518	3571	2624	1676	729
RAU =	8940 (kN); RA2 = 8901 (kN)									
Current CAPWAP Ru = 9880 (kN); Corresponding J(RP) = 0.00; J(RX) = 0.71										

Taulukossa 11 on esitetty esimerkki, jossa vaimennuskertoimen valinnalla on suuri vaikutus paalun geotekniseen kestävyys, koska paalun kärjen nopeus on suuri ja tällöin myös dynaaminen vastus on suuri. Esimerkin paalu on 30 metriä pitkä, 813/12,5, kal-liokärjellinen teräspalkkipaalu. Esimerkin paalun oli tarkoitus toimia kitkapaaluna. Paalun kärkivastus on 6351 kN ja vaippavastus 1149 kN vaimennuskertoimen arvolla 0,45. Vaimennuskertoimen arvolla 0,4 paalun RMX-arvo on 7769 kN ja vaimennuskertoimen arvolla 0,7 RMX-arvo on 6831 kN. Vaimennuskertoimen nosto 0,4–0,7 laskee paalun RMX-estimaattia yli 10 % ja vaimennuskertoimen muutos 0–0,9 laskee RMX-estimaatin arvoa yli 40 %.

Taulukko 11. Esimerkki paalusta, jolla vaimennuskertoimen valinnalla on merkitystä RMX-estimaatin avulla laskettuun paalun geotekniseen kestävyys.

CASE METHOD										
J =	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
RP	11562	10614	9665	8717	7769	6821	5873	4924	3976	3028
RX	11562	10614	9665	8717	7769	7173	6999	6831	6673	6519
RU	11562	10614	9665	8717	7769	6821	5873	4924	3976	3028
RAU =	6305 (kN); RA2 = 6092 (kN)									
Current CAPWAP Ru = 7500 (kN); Corresponding J(RP) = 0.43; J(RX) = 0.45										

Paalutusohjeessa on ilmoitettu suuntaa antavat vaimennuskertoimen arvot (tukipaa-luilla $J_c \geq 0,5$ ja kitkapaaluilla $J_c \geq 0,6$). Ohjearvoja suuremman vaimennuskertoimen käyttö lisää aina varmuutta ja epävarmoissa tilanteissa suuremman vaimennuskertoimen käyttö onkin suositeltavaa, jos ei tehdä signaalinmallinnusta.

3.2.2 Vetopaalut

Vetopaalujen vetokestävyys voidaan määrittää epäsuorasti signaalinmallinnuksen avulla, kun saadaan selville paalun vaippakestävyys puristuksessa. Puristuksessa määritetystä vaippakestävydestä voidaan hyödyntää maksimissaan 80 % vetokestävyyttä määritettäessä, mikäli ei ole tehty erikseen vetokoekuormitusta (Jardine, et al. 2005; Teferra et al. 2008).

Vedossa paalun vaipalla vaikuttavat jännitykset laskevat, jolloin myös paalun vaippa-vastus laskee. Lisäksi vedossa paalu venyy ja kutistuu paalumateriaalin Poissonin va-kion (ν) mukaisesti, joka laskee vaipalla vaikuttavia jännityksiä.

Puristuksessa määritetystä vaippakestävydestä vähennetään vielä 10 % lisää, kun määritetään kärjestä avoimen putkipaalun vetokestävyyttä (Jardine, et al., 2005), koska avoimen putken sisäpuolinen vaippavastus vähenee vetokuormituksessa jännitystason laskiessa. Ilmiö on sama vaipan sisä- ja ulkopinnalla.

Pohjatutkimuksien perusteella tulee arvioida voidaanko paalun vaippavastus hyödyn-tää kaikissa maakerroksissa niin vedossa kuin puristuksessa. Hienorakeisissa maa-kerroksissa saavutettua vaippavastusta ei saa hyödyntää pitkäaikaisessa kuormituk-sessa, jolloin signaalinmallinnuksen avulla saadaan paalun hyödynnettävissä oleva vaippakestävyys vähentämällä hienorakeisten maakerrosten osuus paalun koko vaip-pakestävydestä.

4 Tulosten raportointi

4.1 Koekuormitusraportin keskeinen sisältö

Ohje

Koekuormitusraportin tarkoituksena on välittää objektiivista tietoa paalujen käyttäytymisestä koekuormitustilanteessa. Raportissa esitetään koekuormituksen suorituksen kannalta oleelliset tiedot kohteesta sekä paaluista ja niiden asennuksesta. Lisäksi raportissa kuvataan koekuormituksen suoritus. Raportissa tulkitaan myös sanallisesti koekuormituksen saavutuksia ja tuloksia yhteenvedon tai johtopäätösten muodossa. Koekuormitusraportin sisällön esitysmuoto ja järjestys voivat poiketa alla esitetystä.

Kohteen tiedot

Kohteen paikantamiseksi ja paalujen jäljitettävyyden vuoksi, raportissa ilmoitetaan vähintään kohteen tai työmaan nimi ja paikkakunta, jossa kohde sijaitsee sekä mitattava rakenne.

Raportista tulee ilmetä koekuormituksen tilaaja sekä paalujen asennuksesta vastaava paalutusurakoitsija. Raportissa nimetään koekuormituksen suorittava mittaaaja. Mittaajan yhteystiedot tulee löytyä myös raportista.

Kohteen pohjasuhteet kuvataan lyhyesti pohjatutkimustulosten perusteella. Tämä edellyttää, että mittaaajalle on toimitettu pohjatutkimusaineisto ennen koekuormitusta. Muussa tapauksessa pohjaolosuhteista voidaan tehdä suppeampi kuvaus paalun asennuksen ja koekuormituksen aikana tehtyjen havaintojen perusteella.

Raportissa tulee erikseen mainita, mikäli pohjatutkimusaineisto ei ole ollut mitaajan käytettävissä koekuormituksia raportoidessa.

Paalun ja asennuksen tiedot

Paaluista oleellisia raportissa mainittavia perustietoja ovat paalun tunnus, paalutyyppi, paalumateriaali ja paalukoko. Paalukoon perusteella tulee olla mahdollista määrittää paalun poikkileikkauksen pinta-ala.

Mikäli kyseessä on jatkopaalu, voi paalun jatkos näkyä koekuormituskuvaajissa impedanssin muutoksena. Tällöin raportissa mainitaan paaluelementtien pituudet, jotta jatkoksen sijainti voidaan määrittää ja eikä jatkosta sekoiteta vaurioon paalussa.

Paalun kärjen tyyppi on oleellista huomioida ja mainita raportissa. Tietyntilaisissa olosuhteissa maakärki voi tiivistää maata kärjen alla kalliokärkeä tehokkaammin ja sitä kautta vaikuttaa paalun asennukseen ja geoteknisen kärkekestävyyteen. Myös paalun geoteknisen puristuskestävyyden perusteella tehtävä vaipan vetokestävyyden määrittäminen poikkeaa avoimen ja suljetun putkipaalun kesken. Vaipan vetokestävyyden määrittäminen on kuvattu aikaisemmin luvussa 3.2.2.

Jotta koekuormituksen tuloksia voidaan vertailla paalujen kesken, on raportissa esitettävä paalujen asennusajankohta ja lopetuslyönnit. Ajan myötä paalujen geotekninen kestävyys tyypillisesti kasvaa. Tällöin lopetuslyönneiltään samantyyppisistä paaluista voidaan saada hyvinkin erilaisia tuloksia, mikäli paalut on asennettu eri ajankohtina.

Lopetuslyöntien kannalta on oleellista, että raportissa kerrotaan lyöntilaite, jolla paalut on asennettu ja lopetuslyönnit lyöty. Myös lopetuslyönneissä käytetty pudotuskorkeus tulee mainita.

Koekuormituksen tiedot

Mittausraportissa esitetään graafisessa muodossa vähintään mitattu nopeus- ja voimasiignaali samassa kuvaajassa sekä ylöspäin kulkevan voiman kuvaajaa.

Raportissa kerrotaan, mitä menetelmää paalun geoteknisen kestävyysarvioimiseen on käytetty. CASE-menetelmän yhteydessä ilmoitetaan selvästi, mitä CASE-menetelmän mukaista estimaattia on käytetty sekä käytetyn vaimennuskertoimen J_c arvo kirjallisesti ja mittauskuvauksissa. Lisäksi raportissa tulee esittää CASE-menetelmän mukaisen estimaatin herkkyys vaimennuskertoimen vaihtelulle.

Dynaamisen koekuormituksen tavoitteena on tyypillisesti pyrkiä osoittamaan paalujen riittävä geotekninen kestävyys. Tällöin raportissa esitetään paalun mitoituskuorman ($F_{c,d}$) pohjalta määritetyt vaatimukset mittaustulosten keskiarvosta ($R_{c,m}$)_{mean} ja minimistä ($R_{c,m}$)_{min} sekä estimaatti paaluilta koekuormituksessa mobilisoituneesta staattisesta vastuksesta. Koekuormituksen tuloksille asetetut vaatimukset tulee olla määritetty kohteen vastaavan pohjarakennesuunnittelijan toimesta ennen koekuormitusta. Mikäli vaatimuksia ei ole määritetty ja toimitettu mittaajalle, esitetään raportissa ainoastaan estimaatti paalujen mobilisoituneesta staattisesta vastuksesta.

Paalujen asennuspäivämäärän lisäksi raporttiin kirjataan koekuormituksen päivämäärä ja tarvittaessa jokaisen paalun tarkempi mittausajanhetki. Tällöin on mahdollista arvioida paalujen geoteknisen kestävyyskehittymistä ja vaiheita sekä näin ollen vertailla koekuormitusten tuloksia paalujen kesken.

Raportissa tulee jokaisen paalun osalta esittää mittausantureiden etäisyys paalun kärjestä sekä paalun tunkeuma eli paalun pituus, joka on maanpinnan alapuolella.

Koekuormituksen aikana mitattu paalun pysyvä painuma koekuormitusiskulla sekä koekuormituksella paaluun siirtynyt energia merkitään raporttiin. Mitatun painuman perusteella raportissa voidaan arvioida murtokuorman mobilisointiasetusta. Paalun geoteknisen murtokuorman täydellinen mobilisoiminen vaatii dynaamisessa koekuormituksessa paalun riittävän suuren pysyvän painuman. Vaaditun painuman suuruutta on käsitelty aiemmin kappaleessa 2.3.4. Koekuormituslyöntien aikana mitattu paalun painuman ja lyöntienergia antavat myös lisätietoa paalun käyttäytymisestä tilanteissa, joissa esimerkiksi lopetuslyönneissä on ollut epäselvyyksiä tai mitatut lopetuslyönnit korreloivat huonosti paalulta mobilisoituneeseen staattiseen vastukseen.

Paalun voimakas jousto voidaan havaita iskuaaltokuvaajasta, mutta se on syytä myös ilmoittaa raportissa lukuarvona. Paalujen jouston arvot voidaan taulukoida tai ilmoittaa muuten vastaavasti selkeällä tavalla. Jousto on mahdollista mitata suoraan koekuormitustilanteessa paalun kyljestä tai sitä voidaan arvioida vähentämällä paalun siirtymän maksimiarvosta (DMX) paalun pysyvä painuma (s).

Paalun lyönninaikaisista jännityksistä raportissa tai sen liitteissä tulee esittää vähintään seuraavat suureet:

- *Suurin keskimääräinen puristusjännitys paalun poikkileikkauksessa*
- *Suurin puristusjännitys yksittäisen anturin kohdalla*
- *Suurin keskimääräinen vetojännitys paalun poikkileikkauksessa*

Johtopäätökset ja suositukset

Raportin johtopäätöksissä tai yhteenvedossa tulee ilmetä saavutettiin koekuormituksessa jokaisella paalulla sille vaadittu geotekninen kestävyys ja täytyivätkö muut koekuormitukselle mahdollisesti asetetut tavoitteet.

Johtopäätöksissä on hyvä esittää myös arvio siitä, onko koekuormituksessa paaluun syntynyt pysyvä painuma ollut riittävän suuri mobilisoimaan paalun geotekninen kestävyys kokonaisuudessaan vai onko paalulta mahdollista suuremmalla koekuormitusiskulla mobilisoida vielä suurempi geotekninen kestävyys. Tämä on oleellista varsinkin silloin, kun koekuormituksessa ei ole saavutettu paalulle vaadittua geoteknistä kestävyyttä.

Mikäli koekuormituksessa ei saavuteta sille asetettuja tavoitteita, annetaan raportin johtopäätöksissä arvio paalun geoteknisen kestävyuden kehittymisestä ja suositukset mahdollisista jatkotoimenpiteistä ja uusista koekuormituksista.

Raportin johtopäätöksissä annetaan lisäksi suositus paalujen loppulyöntiehdosta. Suositus loppulyöntiehdosta perustuu kohteessa suoritettuihin mittauksiin ja kohteen vastaava pohjarakennesuunnittelija tai pohjarakenteiden asiantuntijavalvoja päättää, minkälaista loppulyöntiehtoa käytetään. Teräsbetonipaaluilla on suositeltavaa, että paalun lyöminen lopetetaan, kun painuma kymmenellä lyönnillä alittaa 10 mm, koska muutoin paalun vaurioitumisriski kasvaa merkittävästi.

Iskuaaltokuvaajat

Raportin liitteinä esitetään mitatuista paaluista vähintään mitattu nopeus- ja voimasignaali samassa kuvaajassa sekä ylöspäin kulkevan voiman kuvaajaa. Kuvaajien tulkintaa on esitelty kappaleessa 2.4

Raportin liitteinä esitettävien kuvaajien yhteydessä tulee ilmetä seuraavat tiedot:

- *Kohteen nimi ja paalun tunnus.*
- *Aikaleima, milloin koekuormitusku on suoritettu.*
- *Käytettyjen antureiden tunnuksien ja kalibrointikertoimet sekä voimalle ja nopeudelle käytetyt kertoimet (reply factor).*
- *Kuvaajien akselien mittakaava.*

5 Paalujen ehjyysmittaus low strain menetelmällä

5.1 Ehjyysmittauksen periaatteet

Ohje

Ehjyysmittauksen tulkinta tehdään yleensä kohdekohtaisesti kokonaisuutena.

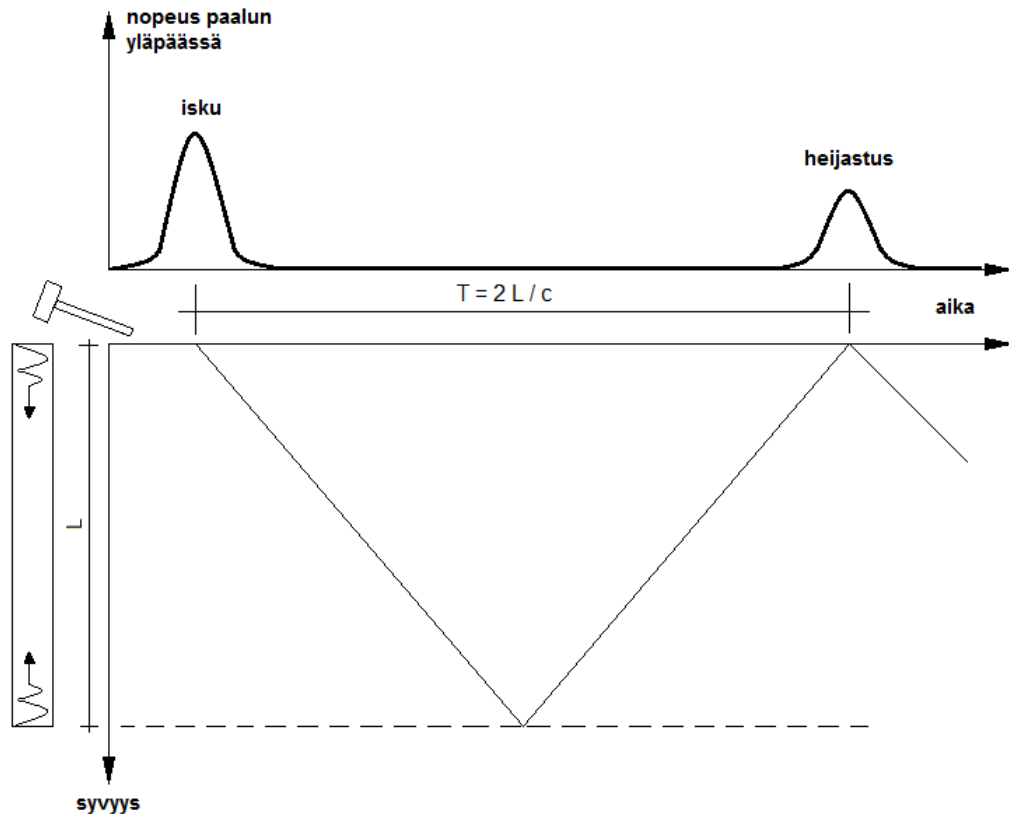
Mittaajalla on oltava aina kohteen geotekniset piirustukset, kun nopeusvaste-kuvaajaa tulkitaan.

Low strain -menetelmällä pystytään arvioimaan paalun ehjyyttä tai pituutta.

Paalujen ehjyysmittaus perustuu kappaleessa 2.1.1 esitettyyn yksiulotteiseen iskuaaltoteoriaan samalla tavalla kuin paalujen dynaaminen koekuormituskin. Low strain -menetelmässä iskuaalto aikaansaadaan paaluun kevyen käsivasaran avulla ja iskuaallon heijastumista mitataan paalun yläpäästä kiihtyvyyssanturilla.

Vasaran ja kiihtyvyyssanturin lisäksi tarvitaan laitteisto mittaussignaalin rekisteröintiä ja käsittelyä varten. Mittauslaitteistolla analoginen signaali muutetaan digitaaliseen muotoon, jota voidaan muokata/käsitellä mittauslaitteella tai tietokoneella. Yleisemmin käytössä olevat laitteistot tunnetaan kauppanimikkeillään PIT, PET ja SIT.

Paalun ehjyyttä arvioidaan nopeusvastekuvaajan perusteella, joka saadaan, kun paalun yläpäästä mitattu kiihtyvyys integroidaan nopeudeksi. Nopeusvastekuvaajan perusteella voidaan havaita impedanssin muutokset paalussa, jotka kertovat siis muutoksista paalun rakenteessa tai materiaalissa. Heijastuksen suuruus nopeusvastekuvaajassa kertoo vaurion tai muutoksen suuruusluokasta paalun rakenteessa samanlaisissa pohjaolosuhteissa. Kuvassa 27 on havainnollistettu ehjyysmittausta low strain -menetelmällä. Kuvassa 27 on ideaalitapaus, jossa paalu on ehjä, sillä ei ole vaippavastusta ja nopeusvastekuvaajasta nähdään selkeä kärkiheijastus.



Kuva 27. Ehjyysmittaus low strain -menetelmällä. Perustuu lähteeseen (German Geotechnical Society, 2013).

Yleensä paalujen vaurioitumiseen ja täten ehjyysmittauksiin johtaa vaikeudet paalujen asennuksessa, runsaasti suurempia kiviä tai lohkaraita sisältävän maakerroksen läpi paaluttaminen, paalujen epänormaali käyttäytyminen asennuksessa, voimakkaat maan liikkeet vaakasuunnassa paalujen asennuksen jälkeen tai sen yhteydessä sekä maan kaivaminen paalujen vierestä. Ehjyysmittauksia tehdään joskus myös silloin, kun pyritään selvittämään aikaisemmin asennettujen paalujen ehjyys ja pituus. Tällaisiin tapauksiin päädytään esimerkiksi silloin, kun rakenteen kuormat tai käyttötarkoitus muuttuvat ja paalujen asennuksen aikainen dokumentointi on ollut puutteellista.

Mittaustulosten tulkinta ja luotettavuus ovat riippuvaisia maaperäolosuhteista, paalun ominaisuuksista ja asennustavasta, ehjyysmittausajankohdasta ja mittajaan ammattitaidosta. Mittaajan ammattitaito voidaan osoittaa laitevalmistajan järjestämällä koulutuksilla.

Ehjyysmittauksen tulkinta tehdään yleensä kohdekohtaisesti kokonaisuutena, jolloin poikkeavuudet on helpompi havaita. Yksittäisen paalun mittaaminen ja tulkinta paalun ehjyydestä voi olla haastavaa, mikäli muista paaluista ei ole vertailumittauksia. Nopeusvastekuvaajia tulkittaessa on mittajalla oltava aina kohteen geotekniset piirustukset, jotta esimerkiksi maakerrosten vaikutusta nopeusvastekuvaajaan pystytään arvioimaan.

Low strain -menetelmällä ei saada selville paalun geoteknistä kestävyyttä vaan sitä varten on tehtävä dynaaminen tai staattinen koekuormitus.

5.2 Soveltuvuus

Ohje

Ehjyysmittaus soveltuu betoni- sekä puupaaluille.

Betonin on saavutettava riittävä lujuus ennen kuin ehjyysmittauksia voidaan suorittaa.

Ehjyysmittausta low strain -menetelmällä voidaan pitää luotettavana vain esivalmistetuilla jatkamattomilla ja paikalla valetuilla paaluilla.

Paalut eivät saa olla liian pitkiä, jotta ehjyysmittaus onnistuu luotettavasti.

Ehjyysmittauksilla voidaan luotettavasti tunnistaa vain suuremmat vauriot paaluissa ja mikäli paalussa on useita vaurioita, voidaan vain ensimmäinen vaurio paalun yläpäästä katsottuna tulkita luotettavasti.

Ehjyysmittaus soveltuu kaikille betonipaaluille (esivalmistetut, työmaalla valmistetut, kaivinpaalut), mutta myös puupaalujen ehjyysmittaus on mahdollista. Betonin on saavutettava riittävä lujuus ennen kuin ehjyysmittauksia voidaan suorittaa. Normaalisti betoni saavuttaa riittävän lujuuden ehjyysmittausta varten noin 7 vuorokaudessa (German Geotechnical Society, 2013).

Merkittävät poikkeamat paalun rakenteessa vaikeuttavat poikkeaman alapuolisen paaluosan ehjyyden tulkintaa, koska usein iskuaallon eteneminen häiriintyy merkittävässä poikkeamassa. Tällaisia poikkeamia voivat olla paalun mekaaninen jatkos, suuri vaurio paalussa tai koko poikkileikkauksen läpi kulkeva halkeama. Erityisesti jatkettujen paalujen alapaalun ehjyyden tulkinta on usein hankalaa, koska iskuaalto ei välttämättä läpäise mekaanista jatkosta. Mikäli kyseessä on jatkettu paalu, eikä ehjyysmittaus low strain -menetelmällä onnistu, voidaan paalun ehjyyttä arvioida dynaamisella koekuormituksella. Ehjyysmittausta low strain -menetelmällä voidaan pitää luotettavana vain esivalmistetuilla jatkamattomilla ja paikalla valetuilla paaluilla.

Paalut eivät saa myöskään olla liian pitkiä, jotta ehjyysmittaus onnistuu luotettavasti. Iskuaalto vaimenee edetessään, joten pitkällä paaluilla ei välttämättä havaita enää selkeää kärkiheijastusta iskuaallon vaimenemisesta johtuen. Ennen ohjearvona oli, että paalun pituus saa olla korkeintaan 30–40 kertaa paalun halkaisija (Hermansson, et al. 1992). Nykyisin kuitenkin voidaan mitata huomattavasti pidempiä paaluja, kun laitteistot ovat kehittyneet (Likins & Rausche, 2000). Paalupituus, jolla ehjyysmittaus onnistuu, on riippuvainen paalun halkaisijasta ja paalua ympäröivästä maaperästä.

Ehjyysmittauksilla voidaan luotettavasti tunnistaa vain suuremmat vauriot paaluissa. Mikäli vaurio on aivan paalun kärjen läheisyydessä, voi vaurion havaitseminen olla vaikeaa. Tällöin on erityisen tärkeää, että kohteesta on saatavilla vertailumittauksia, jotta arvio paalun aallonnopeuden suuruusluokasta saadaan selville ja vaurio kärjen läheisyydessä voidaan mahdollisesti tunnistaa. Voimakkaasti epähomogeenisen paalun ehjyyden tulkinta on haastavaa ja vaatii aina myös vertailumittauksia vastaavista paaluista.

Mikäli paalussa on useita vaurioita, voidaan ensimmäinen vaurio paalun yläpäästä katsottuna tulkita luotettavasti. Myöhempien heijastuksien tulkinta on haastavampaa ja voi olla vaikeaa tulkita, johtuvatko myöhemmät heijastukset aikaisemmasta vauriosta, vai onko paalussa useampia vaurioita. Yleensä tällä ei ole käytännön merkitystä, koska vaurioitunut paalu tulee hylätä.

5.3 Suoritus työmaalla

Ohje

Paalujen ehjyysmittaus suositellaan suoritettavaksi mahdollisimman nopeasti paalun asennuksen jälkeen.

Paalujen yläpäiden tai mitattavien rakenteiden tulee olla saavutettavissa ja näkyvissä, jotta ehjyysmittauksia voidaan suorittaa.

Ennen ehjyysmittausta paalun yläpää puhdistetaan ja poistetaan mahdollisesti rikkoutunut tai heikkolaatuinen betoni paalun päästä sekä tarvittaessa paalun pää voidaan joutua tasoittamaan.

Kaikista ehjyysmitattavista paaluista on oltava tiedossa paalun pituus (ja mahdollisien elementtien pituudet), paalunumero ja paalukoko.

Useimmiten on kannattavaa ehjyysmitata kaikki kohteen paalut, jotta voidaan varmistua paalujen ehjyydestä.

Paalujen ehjyysmittaus suositellaan suoritettavaksi mahdollisimman nopeasti paalun asennuksen jälkeen, jolloin mahdollisiin paaluvaurioihin voidaan reagoida ajoissa. Mittauksien suorittaminen heti asennuksen jälkeen edesauttaa myös paalujen ehjyyden tulkinnassa, kun paalujen vaippavastus ei ole ehtinyt vielä kehittymään merkittävästi.

Paalujen yläpäiden tai mitattavien rakenteiden tulee olla saavutettavissa ja näkyvissä, jotta ehjyysmittauksia voidaan suorittaa.

5.3.1 Lähtötiedot

Kaikista ehjyysmitattavista paaluista on oltava tiedossa paalun pituus (ja mahdollisien elementtien pituudet), paalunumero ja paalukoko. Mikäli tarkoituksena on selvittää olemassa olevien paalujen pituutta, tarvitaan vain paalujen poikkileikkausala ja mahdollinen paalunumero. Parhaiten tarvittavat tiedot mittaja saa selville paalutuspöytäkirjoista ja paalukartasta. Lisäksi tuloksien tulkintaa varten on saatavilla oltava kohteen geotekniset piirustukset.

Pohjarakennesuunnittelijan tai urakoitsijan olisi hyvä keskustella mittajan kanssa ennen mittauksia, mikäli kohteessa on ollut ongelmia tai havaittu poikkeavaa käytöstä paaluilla. Tällöin ehjyysmittaukset pystytään kohdistamaan mahdollisiin ongelma-kohtiin, jos kaikkia paaluja ei ole tarkoitus mitata.

5.3.2 Valmistelu

Ennen ehjyysmittausta paalun yläpää puhdistetaan kaikesta ylimääräisestä ja poistetaan mahdollisesti rikkoutunut tai heikkolaatuinen betoni paalun päästä. Myös kaikki paalun kanton nojaavat tavarat pitää siirtää ennen mittausta. Lisäksi paalun päähän voidaan joutua tasoittamaan alue mittausta varten, jos pää on jäänyt hyvin epätaiseksi katkaisun yhteydessä.

Kiihtyvyyssanturin päässä käytetään pehmeää tahnamaista ainetta esimerkiksi vahaa tai vaseliinia. Tällä pyritään parantamaan kiihtyvyyssanturin kontaktia paalun päähän, jolloin mittaussignaali tulee parempilaatuista ja häiriöt vähenevät.

5.3.3 Isku ja mittaus

Ehjyyttä mitattaessa kiihtyvyyssanturi asetetaan paalun pystyakselin suuntaisesti ja painetaan kädellä paalun päähän kiinni. Sen jälkeen vasaralla lyödään paalun päähän. Anturia ei tule sijoittaa aivan vasaran iskukohtaan viereen. Anturin paikkaa ja vasaran iskukohtaa muuttamalla haetaan paalun poikkileikkauksesta kohta, josta saadaan laadukas nopeusvastekuvaaja. Lisäksi voidaan kokeille iskua erityyppisillä vasaroilla, jos mittaussignaali ei parane anturin paikkaa ja vasaran iskukohtaa muuttamalla.

Käytettävän vasaran painoa ja materiaali vaihtamalla voidaan vaikuttaa iskuaallon kulkuun ja luonteeseen paalussa. Suurempiläpimittaisilla ja pitkillä paaluilla käytetään yleensä painavampaa ja pehmeää vasaraa. Pehmeämpää vasaraa käyttämällä saadaan aikaan pidempi aallonpituus ja matalampi taajuus iskuaallolle, jolloin iskuaalto etenee paalussa syvemmälle. Kovaa ja kevyttä vasaraa käytetään, kun määritetään lyhyiden paalujen ehjyyttä. Kovalla ja kevyellä vasaralla aallonpituus on lyhyempi ja taajuus korkeampi, jolloin aallon erottelukyky on parempi. (German Geotechnical Society, 2013). Yleensä kokeilemalla selviää, minkälaista vasaraa kannattaa käyttää.

Mittaustilanteessa paaluun kohdistetaan normaalisti 3-5 hyvälaatuista lyöntiä, joiden nopeusvastekuvaajien keskiarvosta tulkitaan paalun ehjyys. Useammalla lyönnillä eliminoidaan mahdolliset poikkeamat tai virheet, joita voi esiintyä yksittäisellä lyönnillä. Lyönnit ovat melko kevyitä ja usein vasaran annetaan pudota omalla painollaan paalun päähän noin 20 cm korkeudelta.

Useimmiten on kannattavaa ehjyysmitata kaikki kohteen paalut, jotta voidaan varmistua paalujen ehjyydestä. Mikäli laaja-alaisessa paalutuksessa ilmenee ongelmia tai muutoksia vain tietyllä osalla paaluja, on tietenkin mahdollista määrittää vain näiden paalujen ehjyys.

5.4 Tulosten tulkinta

Ohje

Suodattimien tarkoituksena on selkeyttää nopeusvastekuvaajan tulkintaa ja suodatuksen voimakkuutta on säädettävä niin, ettei olennaista tietoa häviö niiden käytön johdosta.

Muutoksia nopeusvastekuvaajissa peilataan kohteessa suoritettuihin pohjatutkimustuloksiin sekä kutakin paalua tarkastellaan suhteessa kohteen muihin paaluihin.

Esivalmistettujen paalujen ehjyysmittauksien raportoinnissa käytetään taulukossa 12 esitettyä paalujen ehjyysluokitusta. Muita paaluja mitattaessa on vaurioiden arviointi perusteltava kohdekohtaisesti.

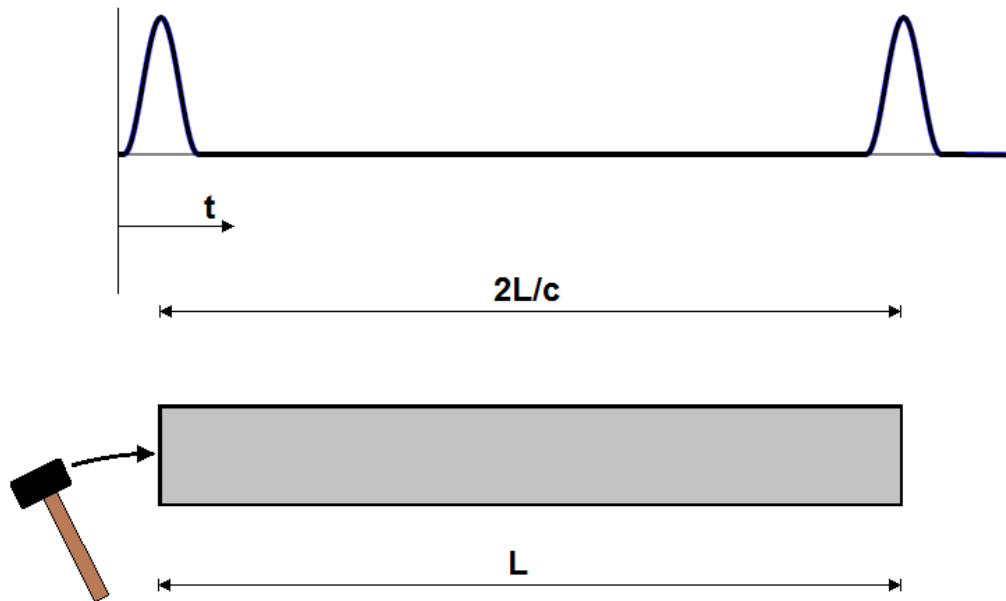
Low strain -menetelmällä suoritettun paalun ehjyysmittauksen tuloksena saadaan paalun nopeusvastekuvaaja, jonka perusteella paalun kuntoa voidaan arvioida. Nopeusvastekuvaajassa on esitetty paalun päästä mitattu nopeus ajan t suhteen.

Käytetystä mittausohjelmistosta riippuen nopeuden positiivinen suunta voi olla ylös tai alaspäin. Alla käydyissä esimerkeissä positiivinen suunta on valittu kuvaajissa ylöspäin ja positiivinen nopeus on alkuperäisen iskuaallon suuntainen.

5.4.1 Nopeusvastekuvaaja

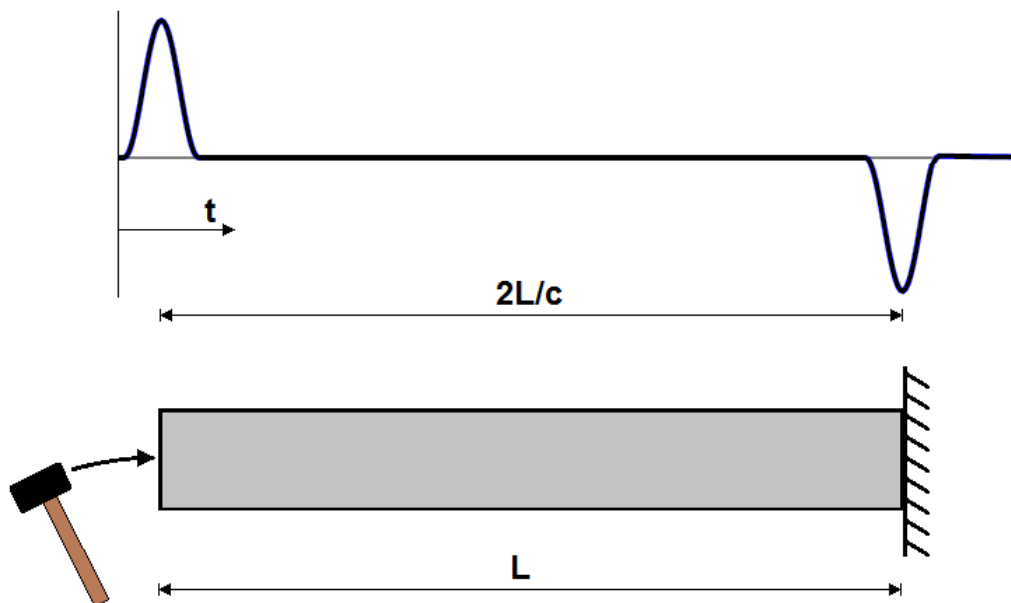
Kuvassa 28 on esitetty mallinnettu nopeusvastekuvaaja homogeenisesta paalusta ilman vaippavastusta. Vasaran aiheuttama iskuaalto näkyy nopeusvastekuvaajan alussa, vasemmassa reunassa, nopeuden kasvamisena. Iskuaallon pituus riippuu käytetystä vasarasta.

Alkuimpulssin jälkeen nopeus palaa nolleen, kun vasara irtaa paalun päästä. Nopeus pysyy nollassa, kunnes paalun kärjestä tuleva heijastus näkyy nopeusvastekuvaajassa ajanhetkellä $2L/c$. Paalun aallonnopeutta c ei yleensä varmuudella tiedetä, vaan se joudutaan määrittämään paalupituuden ja nopeusvastekuvaajan kärkiheijastuksen perusteella. Tällöin väärällä, mutta kuitenkin realistisella aallonnopeudella, lähellä kärkeä olevat suuret vauriot voidaan helposti tulkita paalun kärjeksi, mikäli paalun oikea kärki ei enää vaurion jälkeen nopeusvastekuvaajassa erikseen erotu.



Kuva 28. Homogeenisen paalun nopeusvastekuvaaja paalun kärjen tukeutuessa löyhään maakerrokseen (free toe).

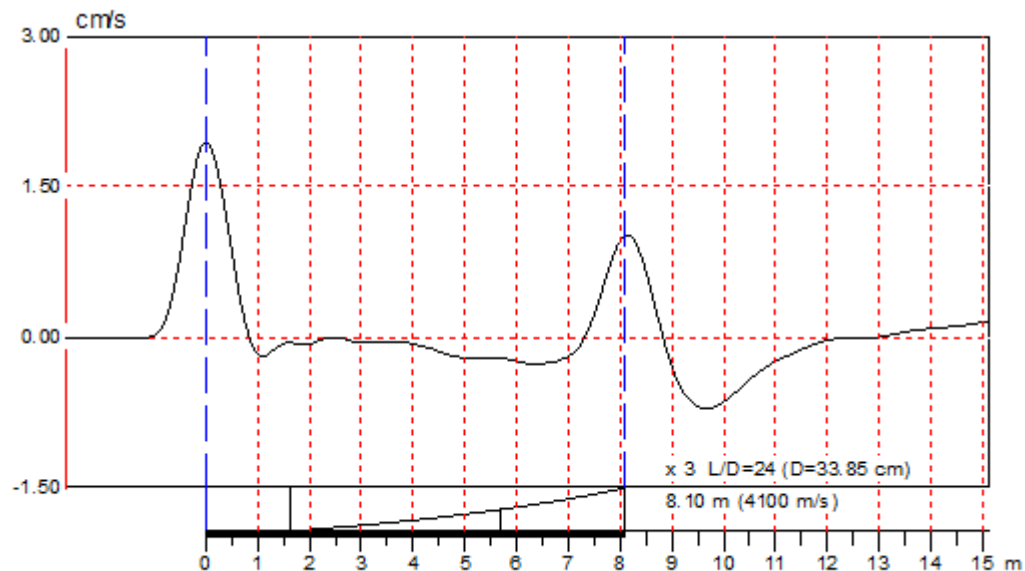
Kärkiheijastuksen suunta (positiivinen/negatiivinen – ylös/alas) riippuu maakerroksen jäykkyydestä, mihin paalun kärki tukeutuu. Kun paalun kärki tukeutuu betonin jäykkyyteen nähden löyhään maakerrokseen, on nopeusvastekuvaajassa näkyvä kärkiheijastus positiivinen (ylöspäin) kuvan 28 tapaan. Kärkiheijastus voi olla myös negatiivinen (alaspäin) kuten kuvassa 29, jos paalun kärki tukeutuu kallioon tai erittäin tiiviiseen moreenikerrokseen.



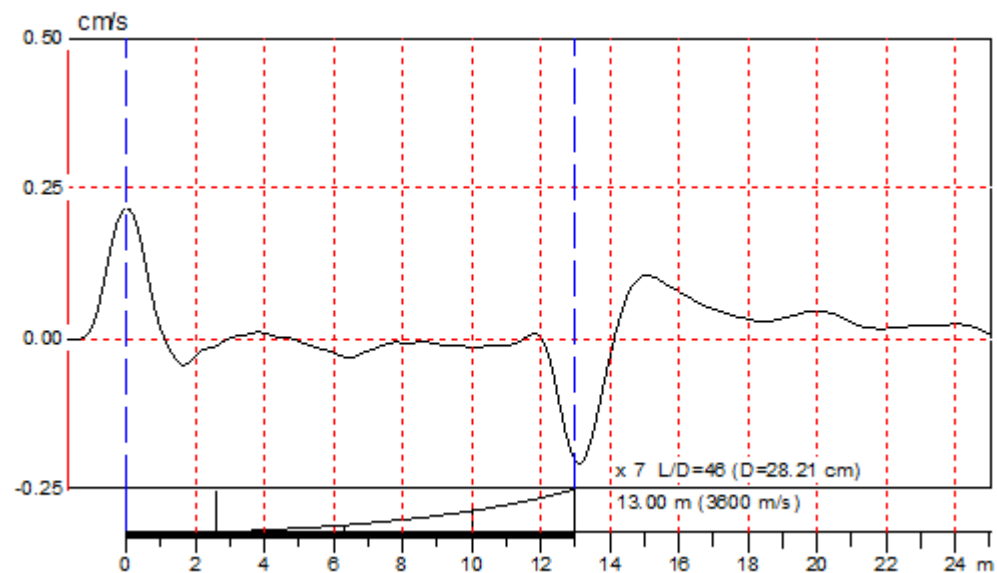
Kuva 29. Homogeenisen paalun nopeusvastekuvaaja paalun kärjen tukeutuessa jäykkään maakerrokseen (fixed toe).

Paalujen dynaaminen koekuormitus ja ehjyysmittaus

Kuvissa 30 ja 31 on esitetty kuvien 28 ja 29 malleja vastaavat, paaluista mitatut nopeusvastekuvaajat. Todellisuudessa paalun vaipalta tuleva vastus vaimentaa iskuaaltoja ja kärjen sekä vaurioiden esiin saaminen nopeusvastekuvaajista edellyttää usein mittaussignaalin vahvistusta.



Kuva 30. Paalusta mitattu nopeusvastekuvaaja, missä paalun kärki näkyy positiivisena heijastuksena (ylöspäin).



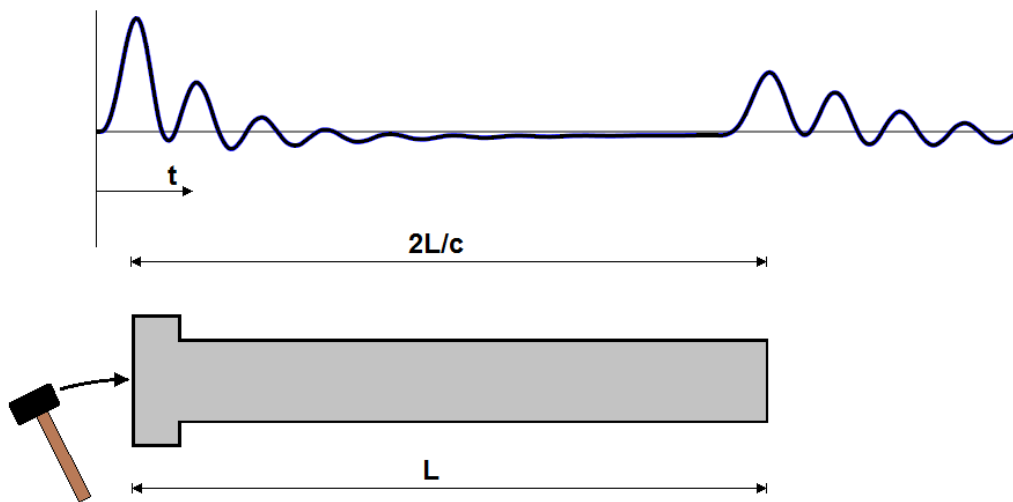
Kuva 31. Paalusta mitattu nopeusvastekuvaaja, missä paalun kärki näkyy negatiivisena heijastuksena (alaspäin).

Vaipaltaan voimakkaasti kiinni olevilla tai erityisen pitkillä paaluilla selkeää kärkiheijastusta ei välttämättä saada esille suurellakaan vahvistuksella. Tällöin paalun ehjyyttä pystytään tulkitsemaan luotettavasti ainoastaan paalun yläosassa. Mittaussignaalin vahvistusta on käsitelty lisää kohdassa 5.4.3.

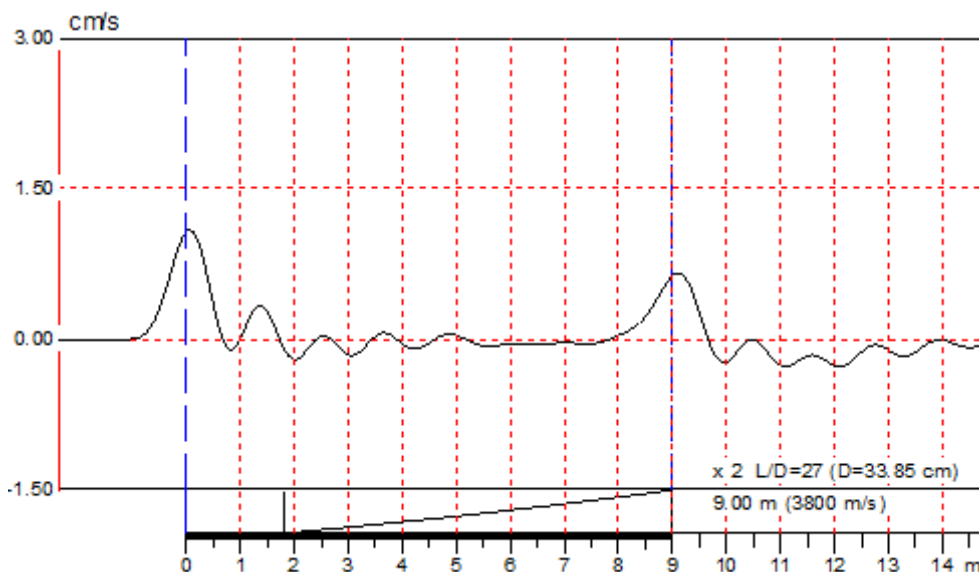
5.4.2 Poikkeavuudet nopeusvaste kuvaajassa

Kärkiheijastuksen lisäksi muut muutokset nopeusvaste kuvaajassa johtuvat paalun impedanssin muutoksesta, maaperästä aiheutuvasta vaippavastuksesta tai sähköisestä/ mekaanisesta häiriöstä.

Nopeusvaste kuvaajiin jää usein epäjatkuvuuskohtia, jotka eivät kuitenkaan johdu paalun vaurioista. Kuvassa 32 on mallinnettu tilanne, jossa paalun poikkileikkausala ja sitä myötä paalun impedanssi on suurempi paalun yläpäässä. Todellisuudessa vastaavanlainen tilanne syntyy, kun maalta tuleva vastus on voimakasta sekä maakerrosten välinen jäykkyys ero on suuri maanpinnassa esimerkiksi täytön ja tiivistämisen tai roudan seurauksena. Tällöin maa ikään kuin toimii yhdessä paalun kanssa kasvattaen paalun impedanssia. Kuvassa 33 on esitetty nopeusvaste kuvaaja paalusta, jonka kannon ympärillä on tiivistetty murskekerros ja paalun kanto oli katkaistu murskeen yläpinnan tasosta.



Kuva 32. Mallinnettu paalun impedanssin muutos ja sen vaikutus nopeusvaste kuvaajaan.

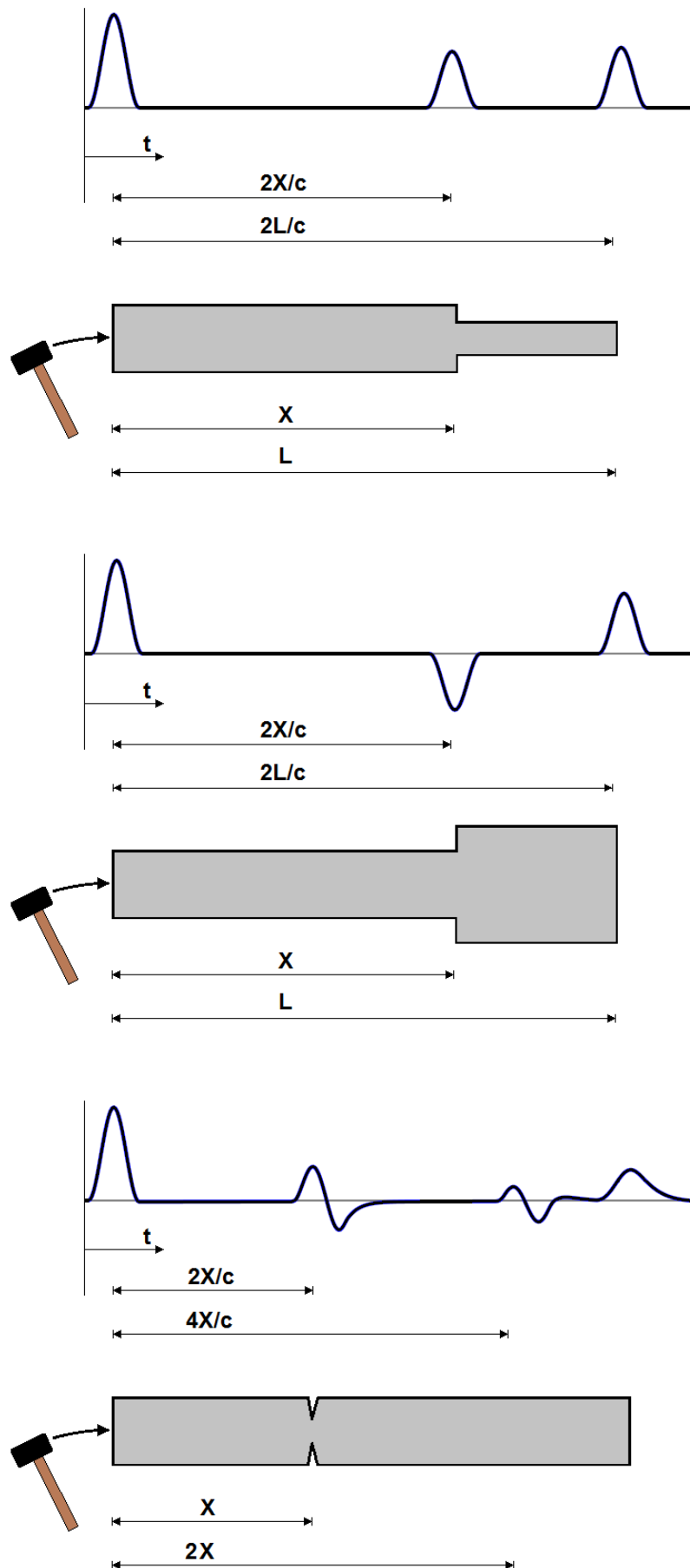


Kuva 33. Paalun vaippavastuksen vaikutus mitattuun nopeusvaste kuvaajaan.

Kuvassa 33 vaippavastuksesta ja maakerrosten jäykkyyserosta aiheutuvat heijastukset ovat poikkeuksellisen voimakkaita. Tyypillisesti maakerroksista aiheutuvat heijastukset ovat amplitudiltaan pienempiä sekä muodoltaan laakeampia ja loivempia. Jotta ympäristöstä ja pohjasuhteista johtuvia poikkeamia nopeusvastekuvaajissa ei kuitenkaan tulkittaisi virheellisesti vaurioiksi, tulisi muutoksia nopeusvastekuvaajissa peilata aina kohteessa suoritettuihin pohjatutkimustuloksiin sekä kutakin paalua tulisi aina tarkastella suhteessa kohteen muihin paaluihin.

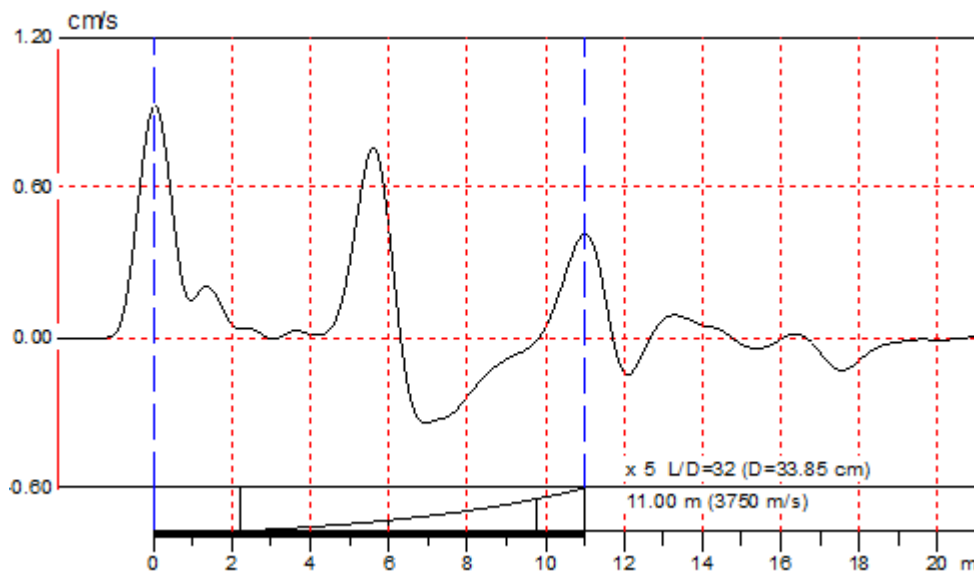
Varsinaiset paalun impedanssin muutokset johtuvat paalun poikkileikkausalan muutoksesta tai paalumateriaalin ja/tai sen ominaisuuksien vaihtelusta. Esivalettujen paalujen kohdalla merkittävät poikkileikkauspinta-alan muutokset johtuvat käytännössä yksinomaan paalun vaurioista. Vaurioiden lisäksi paalun impedanssi muuttuu myös jatkosten kohdalla. Jotta jatkoksia ei sekoiteta vaurioihin, paaluelementtien pituudet eli jatkosten sijainti paalussa tulee olla mittaajan tiedossa.

Kuvassa 34 on esitetty kolme eri tapausta paalun impedanssin muutoksesta ja niiden vaikutuksesta nopeusvastekuvaajaan. Paalun poikkileikkausalan pienetessä myös paalun impedanssi pienenee. Tällöin muutoskohdasta tuleva heijastus näkyy nopeusvastekuvaajassa samansuuntaisena (positiivinen – ylöspäin) alkuperäisen iskuaallon kanssa. Kun paalun poikkileikkaus, ja sitä myötä paalun impedanssi kasvaa, näkyy muutoskohdasta tuleva heijastus erisuuntaisena (negatiivinen – alaspäin) alkuperäisen iskuaallon kanssa. Paikallisesta vauriosta näkyy puolestaan ensin positiivinen heijastus ylöspäin ja heti sen perään negatiivinen heijastus alaspäin. Kuvan 34 tapauksessa paikallinen vaurio, X etäisyydellä paalun kärjestä, näkyy nopeusvastekuvaajassa vaurion kohdalla ajanhetkellä $2X/c$, mutta samainen vaurio heijastuu uudelleen myöhemmin ajanhetkellä $4X/c$.



Kuva 34. Kolme erilaista paalun poikkipintalasta johtuvaa impedanssin muutosta.

Kuvassa 35 on esitetty poikki menneen paalun nopeusvasteokuvaaja. Paalun pituus on 11 m, jolla kohtaa nopeusvasteokuvaajassa näkyy myös voimakas heijastus ylöspäin, kun aallonnopeutena käytetään $c=3750$ m/s. Ennen paalun kärkeä, paalun puolessavälissä, noin 5,5 m etäisyydellä paalun päästä, näkyy toinen voimakas heijastus, mikä viittaa vaurioon paalussa. Vaurio on niin suuri, ettei iskuaalto läpäise sitä ja 11 m kohdalla tuleva heijastus ei todellisuudessa ole paalun kärki vaan vauriosta tulevan heijastuksen kerrannainen. Kolmannen kerran samaisesta vauriosta tuleva heijastus näkyy vielä uudestaan heikkona kohdassa $11+5,5=16,5$. Koska paalun kärkeä ei siis nopeusvasteokuvaajassa näy, varmuutta paalun aallonnopeudesta ei ole ja vauriokohdan tarkkaa sijaintia ei voida määrittää.



Kuva 35. Noin 5,5 m etäisyydeltä paalun päästä poikkimenneen paalun nopeusvasteokuvaaja.

5.4.3 Signaalin vahvistus ja suodatus

Paalun vaipalta tuleva vastus vaimentaa iskuaaltoa ja kärjen sekä vaurioiden esiin saaminen nopeusvasteokuvaajasta edellyttää usein signaalin vahvistusta. Paalun yläosassa, jossa vaipalta tuleva vastus on vähäistä, vahvistusta ei tarvita. Syvemmälle mentäessä paalun vaippavastuksen vaimennus mittaussignaaliin voimistuu, mistä syystä vahvistuksen voimakkuutta kasvatetaan eksponentiaalisesti paalun kärkeä kohti. Tyypillisesti tarvittava vahvistuksen voimakkuus paalun kärjessä vaihtelee välillä $x1 - x20$. Poikkeuksellisen pitkällä ja/tai voimakkaasti vaipaltaan kiinni olevilla paaluilla kärjen havaitseminen vaatii suurempia vahvistuksia ($\sim x20 - x75$).

Nopeusvasteokuvaajassa esiintyvää epämääräistä kohinaa voidaan poistaa laskemalla keskiarvoa useammasta nopeussignaalista, sekä käyttämällä low-pass-suodatinta, joka suodattaa korkeataajuisia häiriötä laskemalla viereisistä arvoista keskiarvoa.

Keskiarvon laskentaan perustuvan low-pass-suodattimen tilalla voidaan käyttää myös muita vaihtoehtoisia suodattimia korkeataajuisen häiriön suodattamiseen. Yksi vaihtoehtoista on käyttää puolikasta siniaallon funktiota painotetun keskiarvon laskentaan (wavelet-suodatin). Samanaikaisesti kahden eri low-pass-suodattimen käyttö ei ole suotavaa.

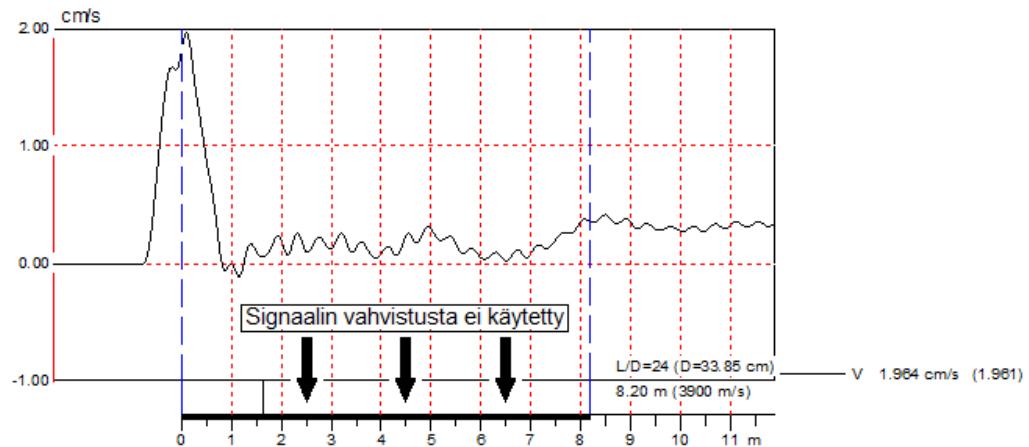
High-pass-suodattimen avulla saadaan osin poistettua maaperän vastuksesta mahdollisesti aiheutuvia matalataajuuksisia komponentteja.

Suodattimien tarkoituksena on selkeyttää nopeusvastekuvaajan tulkintaa ja suodatuksen voimakkuutta on säädettävä niin, ettei olennaista tietoa häviä niiden käytön johdosta. Suodattimien käytössä tulee huomioida myös laitevalmistajan suositusarvot.

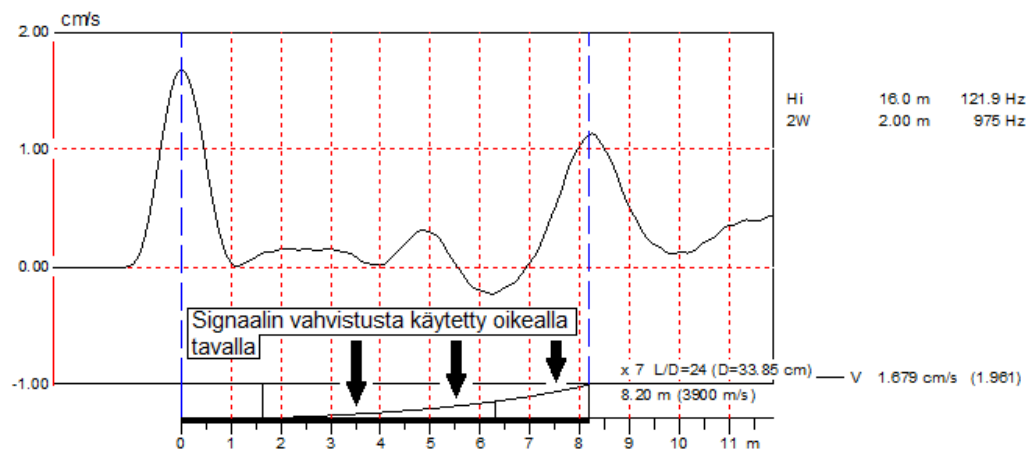
Kuvissa 36–38 on havainnollistettu vahvistuksen ja suodattimien vaikutusta nopeusvastekuvaajaan. Kuvissa käytettyjen suodattimien low-pass (LO), wavelet (2W) ja high-pass (Hi) arvot on esitetty nopeusvastekuvaajien oikealla puolella. Vahvistuksen käyttöä syvyyden suhteen on havainnollistettu nopeusvastekuvaajien vaaka-akselien yhteydessä.

Kuvassa 36 on esitetty 8,2 m pitkän paalun nopeusvastekuvaaja mittaussignaalista, jota ei ole vahvistettu eikä suodatettu. Sama mittaussignaali on esitetty vahvistettuna ja suodatettuna kuvassa 37. Signaalinvahvistusta on käytetty alkaen 1,6 metrin etäisyydeltä paalun yläpäästä, mistä vahvistus voimistuu eksponentiaalisesti kärkeä kohti ja on kärjessä seitsemänkertainen ($\times 7$). Signaalin korkeataajuisia häiriötä on poistettu käyttämällä wavelet-suodattimen puolikkaan siniaallon pituutena 1 m ($2W=2$ m), joka on tyypillisesti riittävä. Pidemmällä low-pass -suodattimen (aallon-)pituuksilla vaarana on olennaisen tiedon häviäminen mittaussignaalista. High-pass -suodattimen pituutena on käytetty noin kaksinkertaista paalupituutta $2 \times 8\text{ m} = 16\text{ m}$. Jos high-pass-suodatinta käytetään, tulisi sen pituutena käyttää vähintään kaksinkertaista paalupituutta tai kymmenkertaista alkuiskuaallon pituutta. Tätä pienemmillä arvoilla high-pass-suodatin voi vääristää mittaussignaalia. Kuvan 37 nopeusvastekuvaajasta voidaan selvästi havaita paalun kärki sekä noin 5 m etäisyydellä paalun päästä lievään paikalliseen vaurioon viittaava heijastus. Vastaavat kohdat on havaittavissa myös käsittelemättömästä nopeusvastekuvaajasta, mutta niiden tulkinta ilman vahvistusta ja suodatusta on huomattavasti hankalampaa.

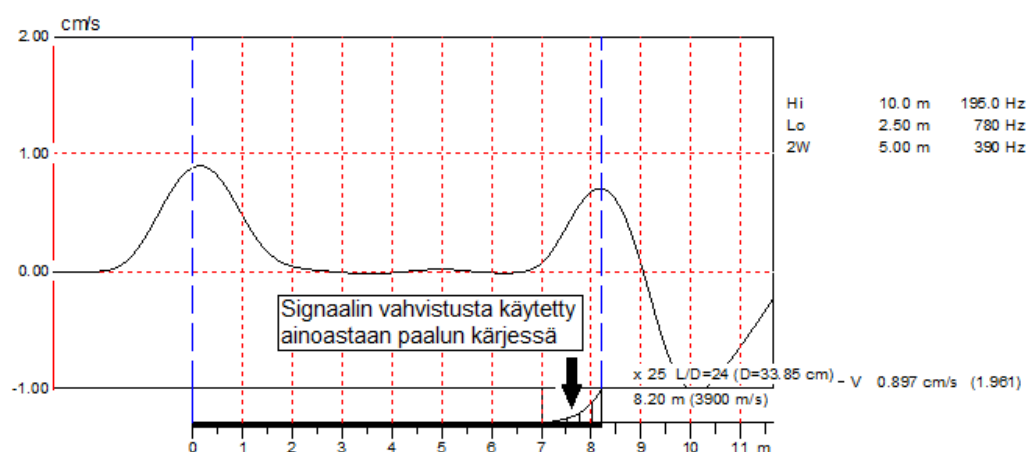
Samainen mittaussignaali on esitetty kolmannen kerran kuvassa 38, jonka nopeusvastekuvaajassa paalun vauriota ei käytännössä pystytä havaitsemaan, mutta paalun kärki näkyy edelleen selvästi. Kuvan nopeusvastekuvaajassa mittaussignaalia on vahvistettu selvästi voimakkaammin ($\times 25$), mutta vahvistusta on käytetty ainoastaan 1 m matkalla paalun kärjessä, jolloin vaurio jää vahvistuksen ulkopuolelle. Lisäksi mittaussignaalia on suodatettu kahdella eri low-pass -suodattimella (Lo, 2W) ja suodattimen (aallon-)pituutena on käytetty suosituksia selvästi suurempia arvoja, mitkä entisestään hävittävät vauriosta tulevaa heijastusta. Kärjen kohdalla voimakas suodatus kompensoituu voimakkaalla vahvistuksella.



Kuva 36. Paalun vahvistamaton ja suodattamaton nopeusvastekuvaaja.



Kuva 37. Oikeaoppisesti vahvistettu ja suodatettu nopeusvastekuvaaja kuvan 36 paalusta.



Kuva 38. Harhaanjohtavasti vahvistettu ja suodatettu nopeusvastekuvaaja kuvan 36 paalusta.

5.4.4 Paalujen ehjyysluokat

Ehjyysmittauksien raportoinnissa käytetään esivalmistettujen paalujen ehjyysluokitusta, jossa paalut on jaettu kolmeen pääluokkaan A, B ja C. Jokaisella luokalla on lisäksi omia alaluokkia, joiden tarkoituksena on tarkentaa pääluokitusta. Paalujen ehjyysluokitus kertoo nopeasti raportin lukijalle, onko mitatut paalut ehjiä ja tarvittaessa asentaa korvaavia paaluja.

A-luokan paalut ovat luokituksen mukaan hyväksyttäviä. A-luokassa on neljä alaluokkaa, jossa A1 on paras luokitus. Muissa alaluokissa (A2, A3, A4) nopeusvastekuvaajassa tai mittauksen onnistumisessa on poikkeamia. B-luokan paalujen hyväksyntä on harkinnanvaraista, koska paaluissa on havaittu lieviä vaurioita tai paalujen mittauksessa on poikkeavuuksia. B-luokassa alaluokkia on yhteensä viisi. C-luokan paalut ovat hylättäviä paaluja, koska paalut ovat joko poikki tai pahasti vaurioitunut. C-luokassa on kolme alaluokkaa. Luokitus on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12. Esivalmistettujen paalujen ehjyysluokitus.

LUOKKA	TULKINTA
A	HYVÄKSYTTÄVÄT PAALUT
A1	Paalussa on isku onnistunut ja paalun alapää näkyy. Mittauskäyrässä ei ole havaittavissa merkkejä vaurioista. Alapään esiin saaminen saattaa edellyttää vahvistusta.
A2	Jatkopaalussa on isku onnistunut ja paalujatkos (jatkokset) näkyy M – etäisyydellä paalun yläpäästä. Paalun alapää ei voida havaita. Osapaaluissa ei ole havaittavissa vaurioita.
A3	Paalulla on selkeä kärkiheijastus, mutta iskuaaltokuvaajassa poikkeamia. Poikkeamat johtuvat joko lievistä vaurioista paalussa, kuten nostolenkkien kohdalle jääneistä harvavaluista tai hiushalkeamista. Poikkeamat saattavat johtua myös maan vaimentavasta vaikutuksesta tai osaan paalua imeytyneestä vedestä, joka aiheuttaa muutoksia paalun impedanssissa.
A4	Muu erikseen ilmoitettava syy.
B	HARKITTAVAT PAALU
B1:M	Paalussa on lievä vaurio M – metrin etäisyydellä paalun yläpäästä. Paalun alapää näkyy.
B2	Paalulla ei ole selkeää kärkiheijastusta, mutta ei ole myöskään selkeitä vetoaaltuja, jotka viittaisivat pahoihin vaurioihin.
B3	Paalulla on epäilyttävän suuri tai pieni aallonnopeus verrattuna kohteen muihin paaluihin.
B4	Paalun yläpää on vaurioitunut eikä paalusta saada kunnollista mittaussignaalia. Paalun yläpää voidaan katkaista vaurion alapuolelta ja mittaus uusia.
B5	Muu erikseen ilmoitettava syy.
C	HYLÄTTÄVÄT PAALUT
C1:M	Paalu on selkeästi poikki M – metrin etäisyydellä paalun yläpäästä. Paalulla ei ole kärkiheijastusta.
C2	Paalu on pahoin vaurioitunut koko matkalta.
C3	Muu erikseen ilmoitettava syy.

5.4.5 Ehjyysmittauksen tarkkuus ja luotettavuus

Low strain -menetelmä on luotettava menetelmä määritettäessä paalujen ehjyyttä, mutta menetelmän tarkkuus ei tyypillisesti riitä havaitsemaan vaurioita, jotka vaikuttavat alle 20 % paalun poikkileikkauksen pinta-alasta (Likins & Rauche, 2000). Pienemmistäkin vaurioista voidaan saada viitteitä, mutta niiden tulkinta ei ole yhtä luotettavaa. Toisaalta tämä on hyvä ominaisuus, koska tällöin paaluja ei hylätä kaikkein pienimpien vaurioiden vuoksi, jotka eivät vaikuta paalun rakenteelliseen toimintaan.

Menetelmällä ei voida siis havaita kaikkein pienimpiä impedanssin muutoksia. Myöskään paalun poikkileikkauksen asteittaisia muutoksia ei voida havaita, koska se sekoittuu usein paalun vaippavastukseen. Ehjyysmittauksen nopeusvastekuvaajasta ei voida havaita, mikäli paalu on käyristynyt maan sisässä. Nopeusvastekuvaajan perusteella ei voida tulkita, miten vaurio sijaitsee paalun rakenteessa. Esimerkiksi, onko paalun raudoituksen suojapeite vaurioitunut, jolloin teräksiset altistuvat korroosiolle. Nopeusvastekuvaajasta voidaan arvioida vain syvyyttä, jolla vaurio esiintyy.

5.5 Ehjyysmittauksien raportointi

Ohje

Ehjyysmittausraportin tarkoituksena on antaa kootusti tietoa mitattujen paalujen ehjyydestä. Raportti sisältää mitattujen paalujen tiedot, ehjyysluokituksen sekä kohteen yleiset tiedot.

Kohteen tiedot

Samalla tavalla kuten dynaamisten koekuormitusten raporteissa, niin myös ehjyysmittausraporteissa tulee esittää kohteen tai työmaan nimi ja paikkakunta. Myös ehjyysmittauksen tilaaja sekä paalujen asennuksesta vastaava urakoitsija nimetään raportissa.

Kohteen pohjasuhteet on syytä kuvata lyhyesti pohjatutkimusten perusteella, mikäli mittaajalla on saatavilla kohteen pohjatutkimusaineisto.

Paalun tiedot

Mitatuista paaluista raportissa esitetään paalun numero, paalukoko ja -tyyppi, elementtien pituudet, kärkityyppi sekä asennuspäivämäärä.

Ehjyysmittauksen tiedot

Raportissa esitetään käytetty ehjyysmittausmenetelmä, ehjyysmittauslaitteiston nimi sekä mittausajankohta. Liitteinä esitettävät nopeusvastekuvaajat ovat ulkoasultaan hieman erilaisia eri laitteistojen kesken, mutta kuvaajien tulkinta tehdään samalla tavalla.

Johtopäätökset ja suositukset

Raportissa esitetään johtopäätökset paalujen ehjyydestä ja nostetaan esiin mittauksissa havaitut poikkeamat, joita ovat esimerkiksi vaurioituneet ja harkittavat paalut (B- ja C-luokka). Raportissa on esitettävä myös käytettävä ehjyysluokitus selityksineen. Johtopäätökset osiossa annetaan suositukset paalujen hyväksymisestä tai hylkäämisestä. Lopullisen päätöksen paalujen hyväksymisestä tai hylkäämisestä tekee kuitenkin kohteen vastaava pohjarakennesuunnittelija tai pohjarakenteiden asiantuntijavalvoja.

Johtopäätöksissä mainitaan ehjyysmittauksessa käytetyistä suodattimista ja vahvistuksista. Liitteissä esitetyissä nopeusvastekuvaajissa tulee myös näkyä käytetyt suodattimet ja vahvistukset.

Liitteissä esitetään ehjyysmittauksista saadut nopeusvastekuvaajat. Kuvaajissa tulee näkyä paalupituus, aallonnopeus, käytetyt suodattimet/vahvistukset sekä paalun ehjyysluokka.

Lähteet

- Alheid, P., Axelsson, G., Berggren, B., Berglars, B., Hermansson, I. & Sarvel, F. (2014). Verifiering av geoteknisk bärförmåga för pålar enligt Eurokod. Pålkommisionen Rapport 106. Stockholm. 76 s.
- Axelsson, G. & Baker, S. (2007). Slagna friktionspålar. Pålkommisionen Rapport 103. Linköping. 103 s.
- ASTM D 4945 - 12. (2013). Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles. ASTM International. 9 s.
- German Geotechnical Society. (2013). Recommendations on Piling (EA Pfähle). Ernst & Sohn. ISBN: 978-3-433-03018-9. Berlin. 496 s.
- Hermansson, I., Romell, J. & Grävare, C-J. (1992). Integritetskontroll av pålar med stöt-vågsmätning. Pålkommisionen rapport 89.
- Jardine, R. J., Chow, F. C., Overy, R. F. & Standing, J. R. (2005). ICP Design Methods for Driven Piles in Sands and Clays. Thomas Telford Publishing. Glasgow. 102 s.
- Kinnunen, J. (2015). Ajan vaikutus kitkapaalujen geotekniseen kestävyYTEEN. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 49/2015. Helsinki. 426 s.
- Komulainen, H. (1989). Paalujen dynaamisen koekuormituksen käyttö. Tiedotteita 1039. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 154 s.
- Liikenneviraston ohjeita 35/2013. (2013). Eurokoodin soveltamisohje Geotekninen suunnittelu – NCCI 7. Liikennevirasto. Helsinki. 73 s.
- Likins, G.E. & Rausche, F. (2000). *Recent Advances and Proper Use of PDI Low Strain Pile Integrity Testing*. Proceedings of the Sixth International Conference on the Application of Stress-wave Theory to Piles 2000: São Paulo, Brazil. s. 211-218.
- Likins, G. E., Rausche, F., (2004). Correlation of CAPWAP with Static Load Tests. Proceedings of the Seventh International Conference on the Application of Stresswave Theory to Piles 2004. Petaling Jaya, Selangor, Malaysia; s. 153-165.
- Likins, G. E., Rausche, F. (2008). What Constitutes a Good PDA Test?. Proceedings of the Eight International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles. Lisbon. s. 403-407.
- Pile Dynamics, Inc. (2003). PIT-WTM Manual.
- Pile Dynamics, Inc. (2014). CAPWAP Background Report Version 2014. 82 s.
- Pile Dynamics, Inc. (2015). Manual for the PDA 8G and PDA-S Software.
- prEN ISO-22477-4. (2016). Geotechnical investigation and testing — Testing of geotechnical structures — Part 4: Testing of piles: dynamic load testing.

RIL 254-2011. (2011). Paalutusohje (2011). Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 261 s.

SFS-EN 1997-1. (2007). Eurocode 7. Geotechnical design. Part 1: General rules. European Committee for Standardization.

SFS-EN 12699. (2015). Execution of special geotechnical works. Displacement piles. European Committee for Standardization. 69 s.

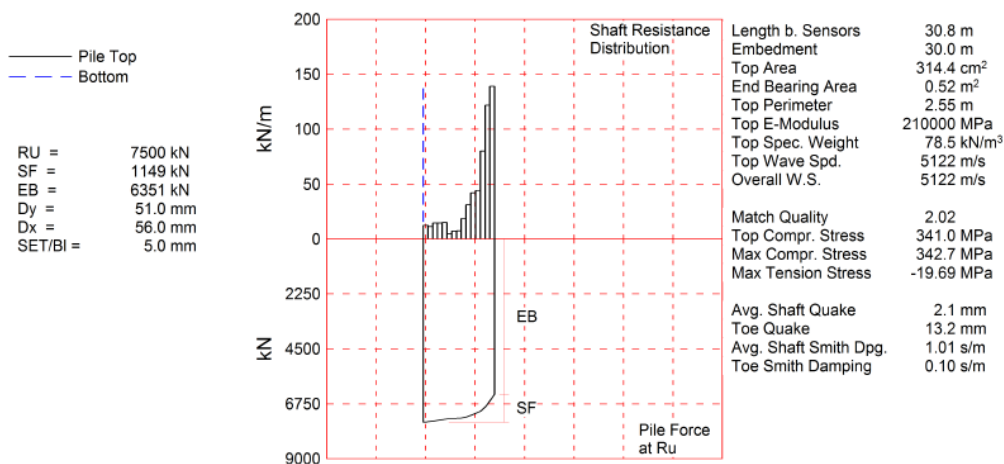
Teferra, W., Saavedra, M.R. & Echaniz, P. (2008). Use of CAPWAP for uplift resistance evaluation of wind energy Tower piles. Proceedings of the Eight International Conference on the Application of Stress Wave Theory to Piles. Lisbon. s. 189–196.

Kärki- ja vaippakestävyys yhdistäminen eri iskuista

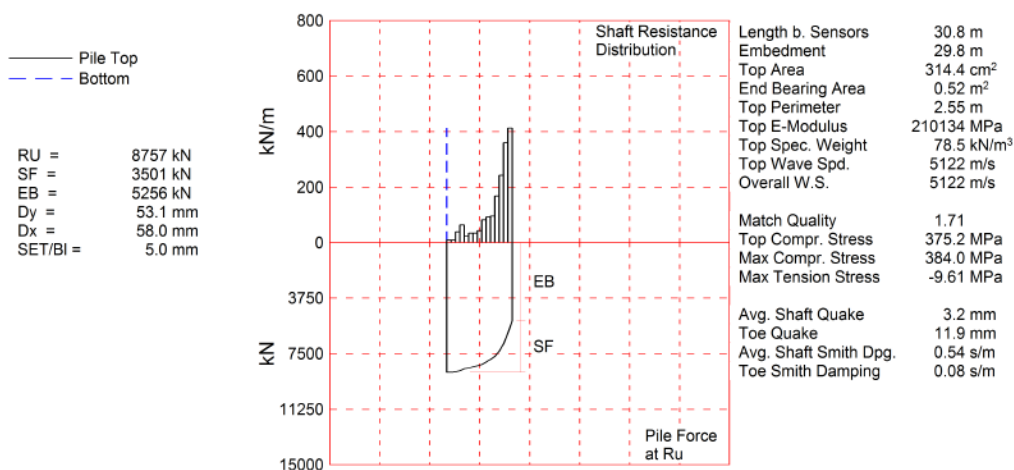
Paalu RR813/12,5

Etäisyys antureista paalun kärkeen on 30,8 m

2 vuorokauden odotusajan jälkeen mitattiin kärjestä 6351 kN ja vaipalta 1149 kN kestävyys. Yhteensä 7500 kN.



14 vuorokauden odotusajan jälkeen mitattiin kärjestä 5256 kN ja vaipalta 3501 kN kestävyys. Yhteensä 8757 kN.



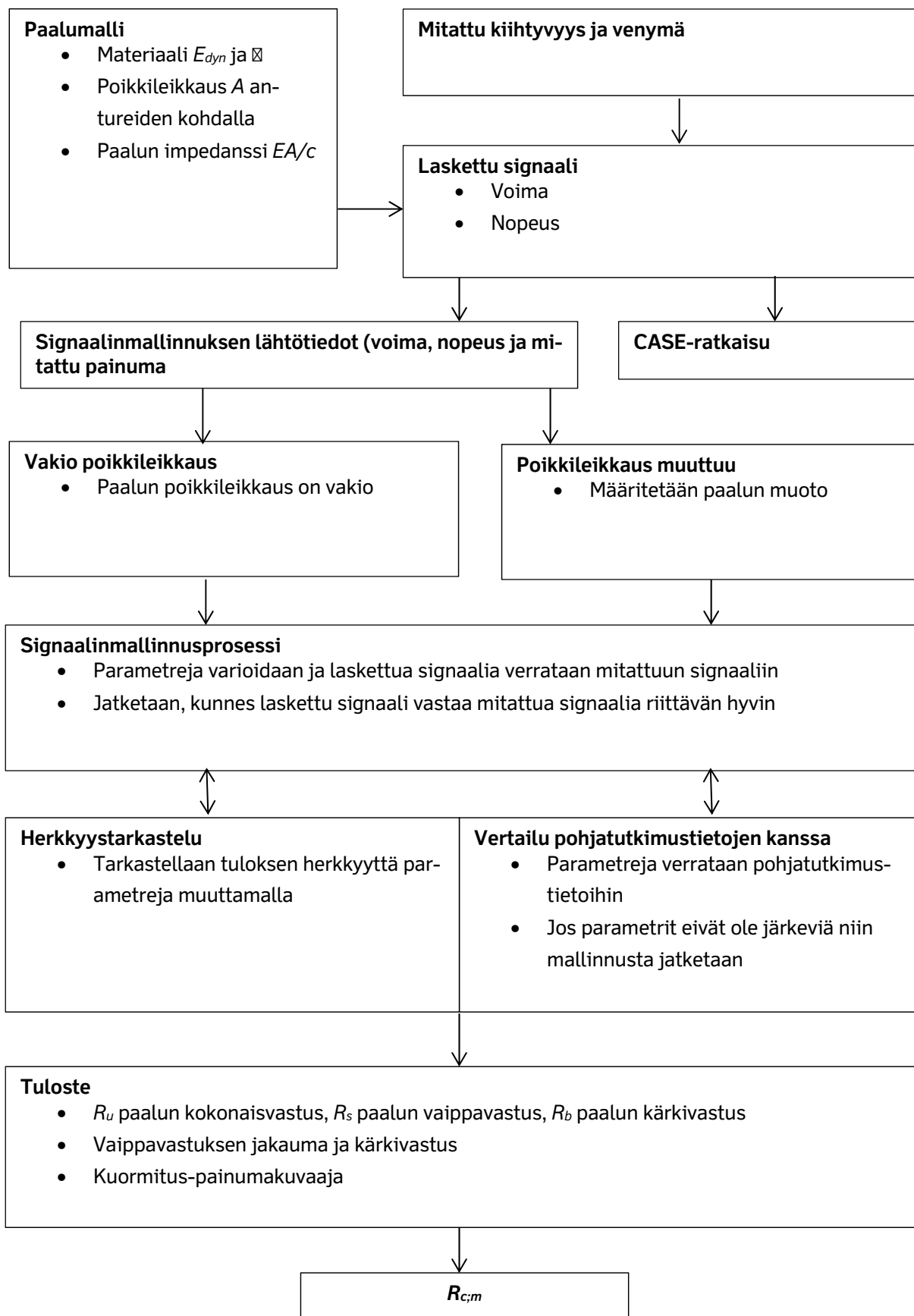
Tässä tilanteessa kärki- ja vaippakestävyys voidaan yhdistää, kun paalun kärjen voidaan olettaa sijaitsevan maakerroksessa, jossa ei esiinny relaksaatiota ja vaippakestävyys hyödynnetään koekuormitusiskusta, jossa paalun pysyvä painuma on ollut maltillinen (5 mm) eikä kärkekestävyyttä ole mobilisoitu kokonaan.

**Lopullinen R_m -arvo paalulle on kärki 6351 kN ja vaipalta 3501 kN.
Yhteensä 9852 kN**

Mittausraporteissa käytetyt merkinnät

s/10:	Pysyvä painuma 10 lyönnillä upotuksen loppuvaiheessa (Junttan HHK 4A, pudotuskorkeus 0,25 m)
s:	Pysyvä painuma koekuormitusiskulla
C:	Jousto koekuormitusiskulla (laskettu vähentämällä PDA-mittauksen DMX-arvosta pysyvä painuma koekuormitusiskulla)
RMX:	Mobilisoitunut staattinen vastus RMX estimaattia käyttäen
(Rc;m)mean	Mittauksissa mobilisoituneiden staattisten vastusten keskiarvo
(Rc;m)min	Pienin mittauksissa mobilisoitunut staattinen vastus
FMX:	Maksimivoima paalussa
EMX:	Paaluun siirtynyt energia
CSX:	Maksimi puristusjännitys koko poikkileikkauksessa (FMX/AR)
CSI:	Suurin hetkellinen puristusjännitys yksittäisen anturin kohdalla
CSB:	Puristusjännitys paalun kärjessä
TSX:	Maksimi vetojännitys paalussa
VMX:	Maksimi nopeus antureiden kohdalla
DMX:	Suurin siirtymä antureiden kohdalla
FVP:	Mitatun voiman ja nopeuden yhtämittaisuus
LE:	Antureiden etäisyys paalun kärjestä
AR:	Paalun poikkipinta-ala
EM:	Paalun kimmomoduuli
SP:	Paalun tilavuuspaino
WS:	Aallonnopeus paalussa
WC:	Keskimääräinen aallonnopeus paalussa
F1234	Käytetyt voima-anturit 2–4 kpl F=Force
A1234	Käytetyt kiihtyvyyssanturit 1–2 kpl, A=Acceleration

Signaalinmallinnuksen kulku



ISSN-L 1798-663X
ISSN 1798-6648
ISBN 978-952-317-329-3
www.liikennevirasto.fi

Liik
enne
vira
sto

Tämä asiakirja on allekirjoitettu

Lista allekirjoittajista

Allekirjoittaja

Todennus